

**Untersuchungen zum hydrologischen Reaktionsverhalten eines kleinen
Einzugsgebietes unter Verwendung des Wasserhaushaltsmodells
WaSiM-ETH
Eine Fallstudie im Rahmen des IPMS-Projektes in Nepal**

Von der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades einer
Doktorin der Naturwissenschaften
(Dr.rer.nat.)
genehmigte
D i s s e r t a t i o n

von Bettina Piepho
aus Hannover

1.Referent: Prof. Dr. Andreas Herrmann
2.Referent: Prof. Dr. Otto Richter
eingereicht am: 13. 02. 2003
mündliche Prüfung (Disputation) am: 27. 06. 2003

(Druckjahr) 2003

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer wissenschaftlich-technischen Projektkooperation zwischen deutschen und nepalesischen Partnern aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, die Dank der Volkswagen-Stiftung im Rahmen eines Verbundprojekts mit dem Schwerpunkt „Umwelt als knappes Gut: Steuerungsverfahren und Anreize zur Schadstoff- und Abfallverringerung“ gefördert und somit erst realisiert werden konnte. Ich möchte daher an dieser Stelle im Namen des Projektes und aller Projektteilnehmer der VW-Stiftung ausdrücklich meinen besonderen Dank aussprechen. Ebenso ganz besonderen Dank an Herrn Professor A. Herrmann, vom Institut für Geoökologie, Abteilung Hydrologie und Landschaftsökologie der Technischen Universität Braunschweig, der nicht nur dieses Projekt ins Leben gerufen hat, sondern uns als Projektleiter auch trotz schwieriger logistischer und politischer Rahmenbedingungen bis zu einem gewinnbringenden Projektende geführt hat.

Innerhalb des Verbundprojekts reiht sich dieser hydrologische Forschungsbeitrag in eine Reihe weiterer Teilforschungsprojekte aus unterschiedlichen Fachdisziplinen ein. Die Realisation dieser Arbeit ist daher auch vor allem durch die konstruktive Zusammenarbeit aller Fachdisziplinen und Projektmitarbeiter ermöglicht worden.

Mein besonderer Dank richtet sich an die Herren Professor A. Herrmann und O. Richter für ihre Unterstützung und ständige Diskussionsbereitschaft. Meinem Mentor, Herrn Professor A. Herrmann, danke ich für seine nachdrückliche Förderung und Sybille Schumann danke ich, für ihre fortwährende Offenheit und ihr engagiertes Projektmanagement.

Für konstruktive Hinweise und Diskussionen im Verlauf der rechnergestützten Modell-anwendung sowie für die programmtechnische Verbesserung danke ich besonders Herrn Dr. J. Schulla und K. Jasper. Für die Unterstützung bodenkundlicher Datenerhebungen und Analysen danke ich Ulrich Egger und Steffen Zuther, für phänologische Aufzeichnungen danke ich Herrn M.S. Paudyal. Nora Söhl und Ulrike Jansen danke ich für die umfangreiche Datenaufbereitung. Ferner danke ich Klaus-Jürgen Schmalstieg und Christian Mahlmann, die mir stets bei computertechnischen Fragen zur Seite standen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Angehörigen des Institutes, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben und vor allem danke ich meinem Mann Helmut von ganzem Herzen für sein Verständnis und seine uneingeschränkte Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit.

Hannover, im Januar 2003 Bettina Piepho

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	v
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen im Anhang	vi
Verzeichnis der Abkürzungen	vii
Verzeichnis der Symbole	viii
Kurzfassung	xi
Abstract	xii
1 Einführung	1
1.1 Einordnung und Rahmenvorgabe	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Ziel der Arbeit	4
2 Stellenwert hydrologischer Simulationsmodelle	7
2.1 Modellklassifikationen	9
2.2 Hydrologische Modellentwicklung	11
2.3 Skalentransferproblematik in der hydrologischen Modellierung	13
2.4 Modellauswahl	15
2.5 Modellstruktur WaSiM-ETH	17
3 Geographische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	19
3.1 Geomorphologischer Formenschatz, Boden und Gewässer	19
3.2 Klimatische Einordnung anhand meteorologischer und hydrologischer Betrachtung	23
3.3 Landnutzung im Untersuchungsgebiet	29

4	Datenbereitstellung	32
4.1	Erfassung und Aufbereitung der temporalen Datensets	34
4.1.1	Hydrologische Betrachtung und Ermittlung der Abflußdaten	36
4.1.2	Prüfung der meteorologischen und hydrologischen Datensätze	39
4.1.3	Anpassung der meteorologischen Datensätze	45
4.1.4	Allgemeine Anpassung temporaler Datensätze	47
4.2	Erfassung, Verarbeitung und Analyse räumlicher Daten	48
4.2.1	Topographische Analyse	49
4.2.2	Ermittlung der Bodenkennwerte durch räumliche Strukturanalyse	51
4.2.3	Übertragung der Landnutzung	56
5	Genutzte Modellkomponenten	58
5.1	Berechnung der Verdunstung	58
5.2	Berechnung der Wasserfließwege im Bodenmodell	61
5.3	Wasserentzug durch Transpiration und Evaporation	64
5.3	Berücksichtigung von Bewässerungsgaben	67
6	Parameterbereitstellung für die verwendete Modellkonfiguration	68
6.1	Parameter zur Abschätzung der Verdunstung	70
6.2	Bearbeitung bodenphysikalischer Parameter	79
7	Modellanwendung	85
7.1	Interpretation der Abflußganglinie	86
7.2	Modellauswertung und Wasserhaushaltsbilanzierung	97
7.3	Beurteilung und Diskussion	104
8	Zusammenfassung	111
8.1	Summary	114
9	Literatur	117
10	Anhang	126

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1.1	Die drei wesentlichen Auswirkungen des Pestizidmißbrauchs und ihre Nebeneffekte	3
Abb. 1.2	Das WaSiM-ETH Modellkonzept Vorbereitung und Aufbereitung der flächenhaften Geländeinformation mittels ARC/View, Einlesen der generierten Rasterkarten (Grids-Input) in das Modell WaSiM-ETH, Weiterverarbeitung und visuelle Darstellung der Modell-Outputs durch ARC/View	6
Abb. 2.1	Forschungsablauf	7
Abb. 2.2	Das Konzept zur Funktionsweise eines Systems	8
Abb. 2.3	Klassifikationsschema hydrologischer Modelle vor dem Hintergrund der Anwendung und dem Grad des Zusammenhangs bezüglich der räumlichen Diskretisierung	9
Abb. 2.4	Betrachtungsmaßstäbe hydrologischer und meteorologischer Prozesse mit Hinweis auf gewählte IPMS Prozeß-Skala	13
Abb. 2.5	Die Modellstruktur des WaSiM-ETH Modells	18
Abb. 3.1	Ausschnitt aus der geologischen Karte	19
Abb. 3.2	Hauptflußnetz Jhikhu Khola mit dem Untersuchungsgebiet im Khet-Land und dem Referenzgebiet im Bari-Land	22
Abb. 3.3	Monsunale Verteilung des Niederschlags während Juni bis September 1997 und jährliche Verteilung des Niederschlags im Jhikhu Khola Einzugsgebiet	24
Abb. 3.4	Klimadiagramm Tamanghat/Nepal	25
Abb. 3.5	Langjährige Beobachtungsreihe der Niederschlagsverteilung, Referenz-Klimastation Tamaghat (Zeitreihe 23 J. ; zusätzlicher Vergleich Khet 2000)	26
Abb. 3.6 a	Wasserhaushaltsbilanz im Khet-Gebiet (Feb. 2000 – Jan 2001)	28
Abb. 3.6 b	Wasserhaushaltsbilanz im Bari-Gebiet (Apr. 2000 – März 2001)	28
Abb. 3.7	Der Anbaukalender	30
Abb. 3.8	Evaluierung zur Landnutzung mit typischem Anbaumuster im Khet-Land. Der Kartenausschnitt markiert Katastergrenzen. Ausgewählte Parzellen verdeutlichen an Hand von Kreisdiagrammen bevorzugt angebaute Kulturen. Repräsentative Flurstücke geben Hinweis auf Bodenqualität.	31
Abb. 4.1	Zeitliche Datengrundlage	34
Abb. 4.2	Tinpile Tal mit gekennzeichnetem Einzugsgebiet Khet und dem Referenzgebiet Bari mit Meßstationen	36
Abb. 4.3	Kanalnetz des Khet-Einzugsgebietes	37
Abb. 4.4	Abflußschlüsselkurve am Bsp. des Khet-Gerinnes	38
Abb. 4.5	Überprüfung der Homogenität. Basisstationen für Niederschlag in Khet und Bari	39
Abb. 4.6	Niederschlagsanalyse in Tinpile und Tamaghat. Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit von Niederschlagsereignissen	40
Abb. 4.7	Quelldatenvarianz am Beispiel des Abflusses im Khet-Gebiet	41

Abb. 4.8	Variabilität des stündlich gemittelten Abflusses (Khet) im Zeitraum 10.10. – 26.10.2000	42
Abb. 4.9	Vergleich zwischen automatisch registriertem und handgemessenem Abfluß in Khet mittels extrahierter partieller Serie	43
Abb. 4.10	Kreuz-Korrelation am Beispiel des Abflusses und des Niederschlages im Khet-Gebiet (Zeitraum 17.07. – 07.09.2000)	44
Abb. 4.11	Verlauf der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchte und der Temperatur im Khet-Gebiet	46
Abb. 4.12	Basiswasserverbrauch am Beispiel der Reisanbauperiode im Khet-Gebiet	46
Abb. 4.13	Topografische Analyse für das Khet-Einzugebiet	50
Abb. 4.14	Probenahmestandorte für Bodenkennwerte	51
Abb. 4.15 a-d	Alternative Verfahren zur räumlichen Strukturanalyse für Bodenkennwerte (K_s -Werte [m/s]) am Beispiel des Khet-Land-Einzugsgebiets	54
Abb. 4.16	Georeferenziertes Luftbild vom Untersuchungsgebiet	56
Abb. 4.17	Kartengenerierung der räumlichen Landnutzungsinformation	
Abb. 4.17 a	Luftbild transformiert, Basisraster 0.6 m	57
Abb. 4.17 b	Landnutzungscodierung, aggregiert auf 2.5 m	57
Abb. 4.17 c	Landnutzungscodierung, aggregiert auf 10 m	57
Abb. 6.1	Die vier Hauptentwicklungsphasen unter besonderer Berücksichtigung der Reiskultur	72
Abb. 6.2	Wachstumsverlauf am Beispiel von Mais während der vier Hauptentwicklungsphasen	72
Abb. 6.3	Bestimmtheitsmaß R^2 für Blattfläche im Verhältnis zum Blatztrockengewicht	74
Abb. 6.4	Beziehung zwischen normierten Werten des Pflanzenwachstums und Trockenmassezuwachses für Mais	75
Abb. 6.5	Anpassung des Wachstumsverlaufs an den idealisierten Zuwachs der Trockenmasseproduktion für Mais	75
Abb. 6.6	Gegenüberstellung der LAI Berechnung auf Basis unterschiedlicher Buzugsflächen (kg/ha oder g/m^2) für Reis	76
Abb. 6.7	Verlauf des Bedeckungsgrad und des Blattflächenindex am Beispiel von Reis	77
Abb. 6.8	Abschätzung des Bedeckungsgrades und des Blattflächenindex an Mais	77
Abb. 6.9	Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung am Beispiel eines typischen Khet-Land-Bodens	80
Abb. 6.10	Häufigkeitsverteilung und Summenkurve der K_s -Werte für Khet-Land-Böden. Mittlere Richtwerte nach dem WaSiM-ETH Modell	82
Abb. 6.11	Bereiche für den Durchlässigkeitsbeiwert (k) wichtiger Bodenarten	82
Abb. 6.12	Klassifizierungsansätze für Bodenarten des Feinbodens im Vergleich mit Ergebnissen nach DIN 4220 und der USDA Soil Taxonomy	83

Abb. 6.13	Bodentypen auf Basis der räumlichen Strukturanalyse am Beispiel des Khet-Land-Einzugsgebiets aggregiert auf 10 m Grid	84
Abb. 7.1	Zerlegung in Teileinzugsgebiete für die Berechnung des Abflußrootings	86
Abb. 7.2	Stark generalisierter Flächenanteil der Bewässerungsfelder (Bewässerungsgrid 10 m)	87
Abb. 7.3	Grundwasserstand bei Standardvoreinstellung mit K_f -Wert E^{-7}	88
Abb. 7.4	Abflußganglinie während der Reisanbauperiode (15.05.–12.08.2000) auf Basis eines Einheitsgrids (CL–clay loam)	88
Abb. 7.5	Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit K_f -Wert E^{-7}	90
Abb. 7.6	Abflußganglinie während der Reisanbauperiode (15.05. – 12.08.2000) auf Basis eines differenzierten Bodengrids	90
Abb. 7.7 a	Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit geschätztem K_f -Wert von E^{-7} und differenziertem Bodengrid	91
Abb. 7.7 b	Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit einem geschätzten K_f -Wert von E^{-7} und SIL-Boden	92
Abb. 7.8 a	Abflußganglinie während der Maisbauperiode vom 22.09.00 bis 12.01.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (5 TG) und differenziertes Bodengrid	92
Abb. 7.8 b	Abflußganglinie während der Maisbauperiode vom 22.09.00 bis 12.01.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (5 TG) und SIL-Bodengrid	93
Abb. 7.9 a	Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit einem geschätzten K_f -Wert von E^{-7} und differenziertem Bodengrid	94
Abb. 7.9 b	Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit einem geschätzten K_f -Wert von E^{-7} und SIL-Boden	94
Abb. 7.10 a	Abflußganglinie während des Kartoffelanbaus vom 03.01.2001 - 04.04.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (5 TG) und differenziertes Bodengrid	95
Abb. 7.10 b	Abflußganglinie während des Kartoffelanbaus vom 03.01.2001 - 04.04.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (5 TG) und SIL-Bodengrid	96
Abb. 7.11 a	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.00 - 12.08.2000 mit CL-Boden	98
Abb. 7.11 b	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.2000 - 12.08.2000 mit differenziertem Boden	99
Abb. 7.12 a	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit SIL-Boden	100
Abb. 7.12 b	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit differenziertem Boden	101
Abb. 7.13 a	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.91 - 04.04.2001 mit SIL-Boden	102

Abb. 7.13 b	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelan- bauperiode vom 01.01.9.01 - 04.04.2001 mit differenziertem Boden	103
-------------	---	-----

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1.1	Zusammenfassende Darstellung der Kerngedanken zur hydrologischen Projektplanung	4
Tab. 2.3	Matrix zur Entscheidungshilfe	15
Tab. 3.1	Gegenüberstellung verschiedener Klimastationen (Bsp. Niederschlag und Temperatur)	26
Tab. 3.2	Niederschlagsstatistik für Tamaghat	26
Tab. 3.3	Gegenüberstellung der Wasserbilanzen mittels Input/Output	27
Tab. 4.1	Modelldatenbedarf	33
Tab. 4.2	Statistische Kennwerte der Meßstellen Khet und Bari	43
Tab. 6.1	Notwendige Parameter für die Modellkonfiguration	68
Tab. 6.2	Ergebnisse aus der Blattflächenindexbestimmung für Kartoffeln	74
Tab. 6.3	Landnutzungstabelle mit Stellgliedern	78
Tab. 6.4	Typischer Bodenkennwerte für das Khet-Gebiet	79
Tab. 6.5	Abschätzung der VAN GENUCHTEN Parameter für Khet-Land-Bodenproben	81
Tab. 7.1	Bewässerungskapazitäten aus dem externen Kanals (NPAD)	97
Tab. 7.2 a	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.00 - 12.08.2000 mit CL-Boden	99
Tab. 7.2 b	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.2000 - 12.08.2000 mit differenziertem Boden	99
Tab. 7.3 a	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit SIL-Boden	101
Tab. 7.3 b	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit differenziertem Boden	101
Tab. 7.4 a	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.01 - 04.04.2001 mit SIL-Boden	103
Tab. 7.4 b	Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.01 - 04.04.2001 mit differenziertem Boden	103
Tab. 7.5	Modellkonfiguration	105
Tab. 7.6	Modellergebnisse zu den drei vorgestellten Anbauszenarien	106
Tab. 7.7	Beurteilung der Modelltauglichkeit	110

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen im Anhang

Abbildungsliste:

A 1.1	Workshop-Ergebnisse
A 1.2	Planungsmatrix ZOPP
A 2.1	Checkliste zur Entscheidungshilfe für die Modellauswahl
A 3.1	Wiederkehrintervall der max. Niederschläge im Referenzgebiet Tamaghat (Beobachtungszeitraum 23 Jahre)
A 4.1	Transformierte Class-A-Pan Verdunstungswerte für Reis, Mais und Kartoffel mit Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse
A 6.1.1	Leitfaden zur Bestimmung des Blattflächenindex
A 6.1.4	Wachstumsverlauf verschiedener Leitkulturen während der vier Hauptentwicklungsphasen
A 6.2.3	Korngrößenverteilung am Beispiel der Khet-Probe 2
A 6.2.4	Korngrößenverteilung am Beispiel der Bari-Probe 2
A 6.2.7	Wasserspannungs-, Wassergehaltsbeziehung am Beispiel des Khet- und Bari-Land-Bodens
A 6.2.8	Typische Infiltrationskurve im Bari-Gebiet
A 6.2.9	Typischer kumulativer Infiltrationsverlauf für einen tonigen Lehmboden
A 7.1	Beispiele für den Wasserentzug durch Verdunstung für die Leitkulturen Reis im Hauptmonsun, für Mais im Postmonsun und für Kartoffel in der Trockenzeit.
A 7.2	Kalkulationsbeispiel für potentielle Grundwasserneubildung bzw. Exfiltration während des Maisanbaus im Postmonsun (Mittelwert in: mm/Zeitschritt)

Tabellenliste:

A 3.2.1	Wasserbilanz für das Khet-Gebiet
A 3.2.2	Wasserbilanz für das Bari-Gebiet
A 4.2	Pflanzenkoeffizienten (K_c) zur Verdunstungsberechnung aus Class-A- Pan Werten für die Leitkulturen Reis, Mais und Kartoffel
A 6.1.2	Ermittlung des Wachstumsverlauf von Reis
A 6.1.3	Ermittlung des Wachstumsverlaufs anhand verschiedener typischer Leitkulturen in Tinipale
A 6.1.5	Ermittlung des Blattflächenindex LAI und des Bedeckungsgrades in Bezug auf Trockengewicht am Beispiel für Reis und Mais
A 6.2.1	Quelldatei: Bodenaufnahme im Untersuchungsgebiet Tinipale
A 6.2.2	Quelldatei Bodenart, Bodenschlüssel und Leitfähigkeit
A 6.2.5	Korngrößenanalyse und Klassifizierung der Bodenarten
A 6.2.6	Lagerungsdichte und Porosität

Verzeichnis der Abkürzungen

<i>Abkürzungen</i>	Beschreibung
<i>CEAPRED</i>	Center for Environmental and Agricultural Policy Research, Extension and Development
<i>CL</i>	Clay loam
<i>DHM</i>	Department of Hydrology and Meteorology
<i>DHM</i>	Digitales Höhenmodell
<i>DEM</i>	Digital elevation model
<i>EZG</i>	Einzugsgebiet
<i>GIS</i>	Geografisches Informationssystem
<i>GW</i>	Grundwasser
<i>GWN</i>	Grundwasserneubildung
<i>HKH</i>	Hindu Kush-Himalaya
<i>HOMS</i>	Hydrological Operational Multipurpose Subprogramme of the World Meteorological Organisation (WMO)
<i>ICIMOD</i>	International Centre for Integrated Mountain Development
<i>IPMS</i>	Integrated Pesticide Management System
<i>IWD</i>	Inverse Distance Interpolation
<i>LAI</i>	Blattflächenindex
<i>NPAC, NPAB</i>	Schlüsselcode für Klimastationen Khet und Bari
<i>NPAD NPAB, NPAK,</i>	Schlüsselcode für den Khet-Wehr-Zulauf, das Bari-Wehr und das Khet-Wehr
<i>PARDYP</i>	People and Resource Dynamics Project (of ICIMOD and others)
<i>SIC</i>	Silty clay
<i>SIL</i>	Silt loam
<i>SLA</i>	Specific leaf area
<i>SL</i>	Sandy loam
<i>TANALYS</i>	Topographische Analyse des digitalen Höhenmodells
<i>TG</i>	Teileinzugsgebiet
<i>WaSiM-ETH</i>	Wasserhaushalts-Simulations-Modell der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
<i>WMO</i>	World Meteorological Organisation
<i>ZOPP</i>	Zielorientierte Projektplanung der Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ)

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
α	Albedo (Anteil der kurzwelligen Strahlung, die reflektiert wird, 0 ... 1)	-
a	Van Genuchten Parameter	-
Δ_e	Steigung der Sättigungsdampfdruck-Kurve	hPa·K ⁻¹
$\Delta\Theta$	entwässerbare Porosität	-
γ_p	Psychrometerkonstante	hPa·K ⁻¹
η	unterer Bodenfeuchte-Grenzwert für Transpiration ohne Reduktion	-
λ	latente Verdunstungswärme	KJ·Kg ⁻¹
Θ	Wassergehalt	m ³ /m ³
Θ_0	Anfangs-Bodenwassergehalt bei Infiltration (0 ... 1)	-
Θ_s, Θ_{sat}	Bodenwassergehalt bei Sättigung	-
Θ_{ψ_g}	Bodenwassergehalt bei vorgegebener Grenz-Saugspannung	-
$\Theta_{m,i}, \Theta_{m,i+1}$	Wassergehalte vor und nach dem Aktualisieren mit den berechneten Flüssen	-
Θ_{wp}	Bodenwassergehalt beim Erreichen des permanenten Welkepunktes	-
ρ	Dichte der Luft bei Normzustand (0 °C, 1013.25 hPa: 1.29 Kg·m ⁻³)	Kg·m ⁻³
ρ	Parameter der Wurzeldichte Verteilung	-
ψ	hydraulische Höhe als Summe aus Saugspannung und geodätischer Höhe	m
ψ_0	Saugspannung an Bodenoberfläche	mm
ψ_f	Saugspannung an der Feuchtefront	mm
ψ_{sat}	Sättigungswassergehalt	m ² .
A	Anbaufläche	m ²
A_e	Einzugsgebietsfläche	m ²
A_L	Blattfläche	m ²
B_h	Breite des Gerinne-Hauptbettes	m
B_v	Breite des Vorlandes	m
c_k	Bodenschichtmächtigkeit	m
c_p	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck $c_p = 1.005 \text{ KJ} \cdot (\text{Kg} \cdot \text{K})^{-1}$	KJ·(Kg·K) ⁻¹
$d,$	Dicken der jeweiligen Schichten, zwischen welchen der Fluss berechnet wird	m
$d_1 \dots d_3$	charakteristische Knickpunkte der Vegetationsentwicklung in Julianischen Tagen	-
d_m	Dicke der Schicht m	m
d_r	Wurzeldichte in der Tiefe z	-
$d_{r,m}$	korrigierte Entnahmedichte	-
e	aktueller Wasserdampfdruck	hPa
E	Fluß latenter Wärme (Verdunstungsrate)	mm
EI	Interzeptionsverdunstung	mm
e_s	Sättigungsdampfdruck der Luft bei der herrschenden Temperatur T	hPa
E_0	Basiswasserverbrauch durch Verdunstung	mm
ET	Evapotranspiration (Gesamtverdunstung)	mm
ET_0	Referenzwert für die Evapotranspiration (<i>Cass-A-Pan</i>)	mm
ETP	potentielle Evapotranspiration (potentielle Verdunstung)	mm
ET_m	max. Evapotranspiration	mm
ET_{pan}	Wasserverbrauch aus der Kesselverdunstung <i>Cass-A-Pan</i>	mm
ETR	reale Evapotranspiration (reale Verdunstung)	mm
E_z	Summe der nicht kompensierbaren Reduktion	-
$E_{z,m}$	zusätzlich für die Evaporation verfügbares Wasser aus Schicht m	mm
F	kumulierte Infiltration	mm
FC	Feldkapazität	-
F_s	kumulierte Infiltrationsmenge bis zur Sättigungszeit (Infiltrationsmodell)	mm
f_h	Anteil der Lichtinterzeption durch Pflanzen	-
G	Bodenwärmefluß	Wh·m ⁻²
i	Laufindex	-
I	Gefälle	m·m ⁻¹
k	Hydraulische Leitfähigkeit	m/s

Symbol	Beschreibung	Einheit
k_0	ungesättigte vertikale hydraulische Leitfähigkeit des Bodens	mm·h ⁻¹
Kc	Pflanzenkoeffizient	-
k_d	Speicherrückgangskonstante eines Einzellinearspeichers	h
k_D, k_H	Speicherrückgangskonstanten für Direktabfluss bzw. Zwischenabfluss (H = hypodermisch)	h
k_e	Extinktionkoeffizient	-
K_h, k_v	Speicherkonstanten für Linearspeicheransatz zur Retentionsberechnung, Angaben in h, k_h für das Hauptbett, k_v für das Vorland	-
K_{korr}	Korrekturfaktor für vertikale hydraulische Leitfähigkeit	-
K_{pan}	Tankkoeffizient für die <i>Class-A-Pan</i> Verdunstung	-
k_{rec}	Rückgangssparameter für das Bodenmodell	-
K_s	gesättigte vertikale hydraulische Leitfähigkeit des Bodens	mm·h ⁻¹
k_o/k_u	Parameter für Bodenmodell, maximaler Anteil zwischen gesättigter und ungesättigter Leitfähigkeit	-
L	Länge der Gerinnestrecke	m
l_j	Länge des Gewässerabschnittes j	m
l_s	Sättigungstiefe	mm
m	Schichtindex (von oben nach unten ansteigend)	mm
M_h	Manning-Stricklet-Beiwert für das Hauptbett	m ^{1/3} ·s ⁻¹
M_v	Manning-Stricklet-Beiwert für das Vorland	m ^{1/3} ·s ⁻¹
M_{Str}	Manning-Strickler-Beiwert für die Rauigkeit des benetzten Umfanges	m ^{1/3} ·s ⁻¹
n	Anzahl	-
n	Van Genuchten Parameter	-
n_a	auffüllbare Porosität	-
P	gemessener Niederschlag	mm
PI	Niederschlagsintensität	mm·(Δt) ⁻¹
P_{korr}	korrigierter Niederschlag	mm
Q_0	maximal möglicher Basisabfluß bei $S_m = 0$	mm
Q_B	Basisabfluß	mm
Q_D	im gesamten (Teil-)Einzugsgebiet gebildeter Direktabfluß in einem Zeitintervall	mm
q	spezifischer Durchfluß	m/s
q_i	spezifischer Durchfluß durch ein Bodenprofil je Längeneinheit	m ² ·s ⁻¹
Q_{out}, Q_{aus}	Ausfluß aus dem Gerinneabschnitt	m ³ ·s ⁻¹
q_v	vertikale Versickerungsrate	mm·s ⁻¹
R^2	Bestimmtheitsmaß der untransformierten Modellergebnisse (Abfluß)	-
r_a	aerodynamischer Widerstand der verdunstenden Oberfläche für turbulenten Wasserdampftransport	s·m ⁻¹
RG	Globalstrahlung	Wh·m ⁻²
R_N	Nettostrahlung	Wh·m ⁻²
r_s	Oberflächenwiderstand der verdunstenden Fläche gegen den Übergang von Wasserdampf in die Atmosphäre	s·m ⁻¹
r_{sc}	Blattoberflächenwiderstand der Pflanze gegen den Übergang von Wasserdampf in die Atmosphäre (bei voller Wasserversorgung)	s·m ⁻¹
r_{ss}	Oberflächenwiderstand des Bodens gegen den Übergang von Wasserdampf in die Atmosphäre (bei optimaler Wasserverfügbarkeit)	s·m ⁻¹
SB	Bodenspeicherinhalt	mm
SH	Zwischenabflußspeicher (Speicher für Interflow)	mm
SI	Interzeptionsspeicherinhalt	mm
t	Zeit	h oder s
T	Lufttemperatur	°C
T_0	hydraulische gesättigte Transmissivität ($T_0 = \int K_s dh$)	m ² ·s ⁻¹
T_h	hydraulische Transmissivität	m ² ·h ⁻¹
t_i	Dauer eines Intervalls des in n Intervalle geteilten hellen Tages	h
T_m	Transpirationsentnahme aus der Schicht m	mm oder m/s
t_s	Sättigungszeit ab Beginn des Zeitintervalls	h
t_j	Tagnummer im julianischen Jahr (1. Januar: $t_j = 1$)	-

<i>Symbol</i>	Beschreibung	Einheit
T_v	Abflußtiefe im Vorland eines Gerinnes	m
u_*	Reibungsgeschwindigkeit	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
U_h	benetzter Umfang eines Gerinnes	m
V	Verdunstung	-
v	Vegetationsbedeckungsgrad (Interzeptionsmodell) (0 ... 1)	-
v_2	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
W_L	Blattgewicht	g
W_{TL}	Gesamtes Blattgewicht	g
z	Tiefe der Bodenoberfläche	m
z	Vertikalkoordinate	m
z_0	aerodynamische Rauigkeitslänge	m
z_h	Höhe über Grund	m
$z_{t,0}$	Tiefe an Bodenoberfläche (= 0)	mm
z_W	maximale Wurzeltiefe	-

Kurzfassung

In dieser Studie wird ein modular aufgebautes Simulationsmodell vorgestellt, mittels welchem das hydrologische Verhalten eines kleinen Einzugsgebietes in den Mittelgebirgen Nepals untersucht und beschrieben wird. Das Untersuchungsgebiet gehört zu einer geschlossenen Untereinheit innerhalb des Jhikhu Khola Einzugsgebietes, 50 km östlich von Kathmandu. Das verwendete Modell WaSiM-ETH Zürich (**W**aterbalance **S**imulation **M**odel) basiert auf physikalisch-numerischen Gesetzmäßigkeiten, ist deterministisch flächendetailliert und wird durch GIS/ArcView unterstützt. Mit dem komplexen Modellsystem ist es möglich, verschiedene Modellkonfigurationen anzuwenden, wodurch unter der gegebenen Fragestellung und mit den bereit gestellten Dateninformationen eine bestmögliche Anpassung geschaffen werden kann. Vor diesem Hintergrund werden Aspekte hinsichtlich der inhärenten Wasserströme im Einzugsgebiet einschließlich dessen Wasserhaushaltsbilanzen beschrieben.

Datenbereitstellung und Aufbereitung (Preprozessing) sind für die modelltechnische Umsetzung eine maßgebliche Vorbedingung. Im diesem Zusammenhang sind spezielle Probleme zu der Datenbeschaffung und Parameterbestimmung aufgegriffen und diskutiert worden. Die Preprozessingverfahren beschreiben zum Einen die Herleitung unterschiedlicher Standardrasterkarten, zum Anderen werden Parameterbestimmungen zu bodenphysikalischen und pflanzenphänologischen Kennwerten diskutiert.

Im Zuge der Modellanwendung wird ein neues Bewässerungsmodul integriert und auf Eignung getestet. Die erzielten Modellergebnisse bezüglich der Wasserhaushaltsbilanzen sind von den gegebenen Projektrahmenbedingungen abhängig. Bei ausreichender Datengrundlage und angemessener Diskretisierung kann das hydrologische Einzugsgebietsmodell als effektives und praktisches Hilfsmittel angesehen und im landnutzungsbezogenen Planungsbereichen angewendet werden. Hinsichtlich des IPMS-Projekts vermitteln die Simulationen einen Eindruck über das Systemverhalten im Repräsentativgebiet und können folglich im Sinne eines verstärkten Gewässerschutzes berücksichtigt werden. Die Erkenntnisse bieten eine solide Grundlage zur Entscheidungsfindung für nachhaltige Landnutzungspraktiken unter Einbeziehung eines Pestizidmanagements.

Abstract

This study presents a modular modelling system for simulating the hydrological behaviour of a small catchment in the middle mountains of Nepal, right in the investigation area of a close sub-unit of Jhikhu Khola catchment, 50 km east of Kathmandu. The model used is WaSiM-ETH Zürich (**W**aterbalance **S**imulation **M**odel) which is a physically-based distributed hydrological catchment simulation model with the ability to interface with GIS/ArcView. Within this complex modelling system it is possible to combine the different model configurations in order to achieve an effective modelling structure with the best adaptation to the treated problem and the actual data base. Aspects about surface runoff and water flow as well as evaporation and soil water balance are described.

Data preparation and/or data pre-processing is an imperative. Therefore some problems of data acquisition and parameter estimation are briefly touched, which incorporates on the one hand different standard grid map types, on the other hand the importance of parameter determination with respect to soil properties and plant phenology were described..

The application of a brand new irrigation module was tested and its results are presented. The range of precision and the extent of different data bases for calculating the water balance of agricultural site depends on actual boundary conditions in the project scale concepts. This type of hydrological catchment simulation model seems to be an effective and practical tool in planning land use practices, if data availability and data requirements are all clarified in suitable discretisation. Regarding to the IPMS-project the present simulation results helps to understand the scaling behaviour of catchment response and consequently could be used for the prevention of water pollution. Therefore the study serves as a sound basis for decision making in sustainable land use practices including integrated pesticide management.

1 Einleitung

1.1 Einordnung und Rahmumgebung

Das hydrologische Systemverhalten eines kleinen Wassereinzugsgebietes in dem Mittelgebirge Zentral-Nepals (Kabhrepanalchok Distrikt) ist Zielobjekt dieser Untersuchung, in der es darum geht, den Wasserkreislauf mit seinen Flüssen, komplexen Wechselwirkungen und zeitlichen Verweilzeiten besser verstehen und quantitativ abschätzen zu können. Zur Beschreibung der zugehörigen Prozesse wird ein hydrologisch flächendetailliertes modulares Modellsystem angewendet und auf Eignung unter den gegebenen Bedingungen geprüft. Diese hydrologische Studie ist Teil des Forschungsprojektes *“Environmental risk of pesticides and sustainable development of Integrated Pest Management System for mountain areas of developing countries considering socio-economic conditions and taking Middle Mountains, Central Nepal as an example (IPMS-Project)”*, dessen Hauptanliegen darin besteht, die potentiellen Risiken auf die Umwelt durch Pestizidmißbrauch zu erforschen und ein richtungsweisendes Regelwerk zur nachhaltigen Entwicklung eines integrierten Pestizidmanagements unter Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Verhältnisse zu erarbeiten, damit zukünftig die Bedrohung durch Pestizide abgemildert werden kann (HERRMANN 1997; HERRMANN & SCHUMANN 1999). Bedingt durch die Beteiligung naturwissenschaftlicher und sozio-ökonomischer Disziplinen auf nepalesischer und deutscher Seite wird auf interdisziplinärer Arbeitsebene für das Verbundprojekt ein multilateraler Forschungsansatz verfolgt. Das IPMS-Projekt wurde 1999 ins Leben gerufen und auf eine Laufzeit von drei Jahren angesetzt. Informelle Einzelheiten zu diesem IPMS-Projekt einschließlich seiner Organisationsstruktur, sind in Beiträgen von HERRMANN, 1997 und HERRMANN & SCHUMANN 2002 u.a. ausführlichen beschrieben.

1.2 Problemstellung

In vielen Entwicklungsländern, so auch in Nepal wird der wachsende Pestizidmißbrauch als ein ernst zu nehmendes Problem angesehen (s. web-Seiten: FAO; UNEP u.a.). Nicht nur die Landwirte, sondern auch die Verbraucher auf den lokalen Märkten einschließlich der damit verbundenen lebensnotwendigen Umweltressourcen Wasser und Boden sind direkt betroffen. Ursache ist der ständig wachsende Bevölkerungsdruck, der erhöhte Produktivität auf immer stärker parzellierten landwirtschaftlichen Nutzflächen erfordert. Daher trägt heute auch die noch vor Dekaden hochgelobte Grüne Revolution ihren Teil dazu bei und wird durchaus kritisch beurteilt (ARNOLD 1985). Die Grüne Revolution brachte nicht nur profitable Innovationen für die Landwirtschaft mit sich, sie zeichnete sich auch durch Rückschläge bedingt durch potentielle Risiken excessiver Pestizidanwendung auf Umwelt und Gesundheit aus (s. Abb. 1.1). Als Folge daraus sind heutzutage Ernterückgänge zu beobachten und damit zusätzlich verbundene finanzielle Ausgaben erforderlich.

Vor diesem Hintergrund vermittelt die Abb. 1.1, die in Anlehnung an die Arbeit von BAKER & GYAWALI (1994) aufgearbeitet wurden, eine Zusammenfassung der Kausalitäten. Sie zeigt die drei hauptsächlichen Nebenwirkungen durch Pestizidmißbrauch in Nepal auf (*ecological damages, impact of human health, economic loss*), womit gleichzeitig der enge Zusammenhang zwischen sozio-ökonomischen, als auch agro-ökologischen Aspekten deutlich wird. Eine Bestätigung dieser beunruhigenden Untersuchung vermittelt die kürzlich vorgelegte sozio-ökonomische Projektstudie von CEAPRED (2000), in der insbesondere der intensiv landwirtschaftlich genutzte *Kabhre Panalchok* Distrikt, in dem auch das Untersuchungsgebiet liegt, besonders hohe Ausgaben für Pestizide tätigen mußte. Deshalb besteht die Notwendigkeit, geeignete Lösungen, nachhaltige IPMS-Maßnahmen und -auf politischer und ökonomischer Ebene- Strategien zu einer Reglementierung der Pestizide zu entwickeln. Richtungsweisende Maßnahmen wurden auf dem internationalen IPMS-Workshop in Kathmandu 2001 vorgeschlagen (HERRMANN 2002; außerdem Bsp. A. 1.1 *Pin boards with key problems, problem analysis, solving approaches and recommendations*). Wünschenswert wäre, wenn die Ergebnisse des IPMS-Projekts mit den daraus abgeleiteten Empfehlungen entsprechende Impulse nicht nur für das betroffene Untersuchungsgebiet in Nepal, sondern auch für vergleichbare Regionen geben könnten.

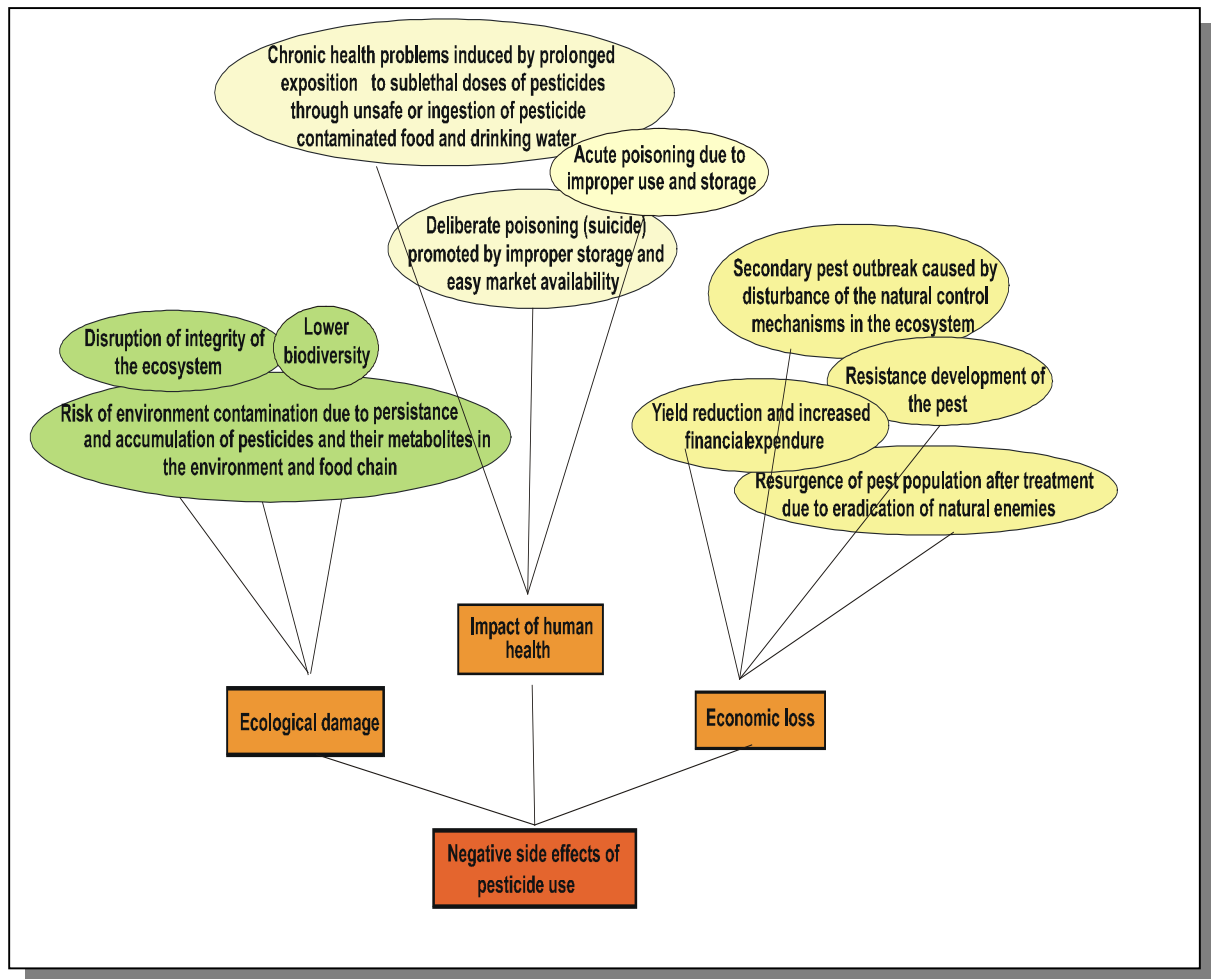


Abbildung 1.1 Die drei wesentlichen Auswirkungen des Pestizidmißbrauchs und ihre Nebeneffekte (in Anlehnung an BAKER & GYAWALI 1994)

Figure 1.1 Three main effects and their causalities regarding to negative side effects of pesticide use (modified after: BAKER & GYAWALI 1994)

Diese Ausgangslage verdeutlicht die Erfordernis, auch speziell die ökologischen Aspekte im komplexen Kontext nachhaltig zu schützen. Zentrale Bedeutung kommt hierbei dem hydrologischen IPMS-Teilprojekt zu, welches durch quantitative Grundlagenforschung zu nachhaltiger ökologischer Nutzung beitragen soll. Nur wenn die Komplexität des Wasserkreislaufs verstanden und erfaßt wird, kann das Wissen zur sukzessiven Strategieentwicklung verarbeitet und übertragen werden. Das ermöglicht, negative Auswirkungen auf den hydrologischen Kreislauf und potentielle Risiken im Hydroökosystem aufzuzeigen.

Der Kerngedanke der Projektkomponente Hydrologie ist daher, das charakteristische Verhalten des Transportmediums Wassers im Systemkomplex -Klima, Pflanze und Boden- zu erfassen und das spezifische Fließverhalten abzuschätzen. Mittels Modellierung soll dabei der Versuch unternommen werden, das Wirkungsgefüge im System angemessen zu reproduzieren.

1.3 Ziel der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird die Hypothese vertreten, daß ein Modell das Fließverhalten des Wassers im Einzugsgebiet verstehen helfen kann, wenn es gelingt, durch physikalisch-numerische Behandlung und bei modularer Struktur die wichtigsten physikalischen Prozesse zu beschreiben (Direkt- und Zwischenabfluß, Ex- und Infiltration, Einfluß durch Bewässerungsgaben, Abflußverhalten von Terrasse zu Terrasse einschließlich der Verweildauer, Ausfluß am Gebietsauslaß, Wasserbilanz). Ferner wurde bei Projektbeginn angenommen, daß das gewählte Untersuchungsgebiet durch ein quasigeschlossenes hydrologisches System repräsentiert wird und quasihomogene Verhältnisse aufweist.

Zur praktischen Umsetzung wurden zu Projektbeginn einige projektrelevante Überlegungen auf Grundlage der populären **zielorientierten Projektplanung** (ZOPP) durchgeführt, um die günstigste Herangehensstrategie heraus zu arbeiten und Machbarkeiten ausfindig zu machen, sowie Rahmenbedingungen definieren zu können (Evaluierung siehe Quellmatrix im Anhang A 1.2). Die entsprechenden Informationen stellen die Ausgangssituation dieser hydrologischen Studie da und verdeutlichen Kerngedanken für die hydrologische Teilprojektplanung, die in der Tab. 1.1 zusammengestellt sind. Das Resultat kann als Wegweiser zur Strategieplanung angesehen werden (s. Strategie in Tab. 1.1)

Tabelle 1.1 Zusammenfassende Darstellung der Kerngedanken zur hydrologischen Projektplanung
Table 1.1 Synopsis of internal project design "Hydrology"

Why ?	To strive for environmental risk assessment of pesticides and integrated pesticide management in developing countries	<i>primary aim</i>
What ?	To produce a knowledge-based rule and expert system available for tentative pesticide reduction measures (considering the national control mechanisms of local agronomic, socio-economic and environmental boundary conditions)	<i>project over goal</i>
Who ?	Hydrology is able to achieve contribution to that issue	<i>hydrological project</i>
What ?	Realization of describing the major physical processes in the individual parts of hydrological cycle	<i>project purpose</i>
Which ?	Importance of following external factors and boundaries: Security, logistic, facilities, collaboration, representative experiment field, suitable research methods, application of PC –tools is realistic, extremely packed time frame	<i>Important assumption</i>
How ?	Strategy: Hypothesis development Stock-taking and evaluation of mandatory basis data (physical feature resources/basin characteristics) and model choice Implementation of new In situ-tests Pre-processing of grid maps and data sets Process studies through the application of integrated components (GIS & Water Simulation Program) Post-processing Application of case study Visualisation Consequences)	<i>objectively verifiable indicators</i>

Where ?	Identification and Evaluation: Allocation of experimental fields Topographic -, geologic - and soil maps Literature survey Assessment of existing environmental data Regular recording of meteorological data from climate station and recording gauges, piezometers and other measurement equipment Scientific studies and pure research (experiments and field tests)	means / sources of verification
To whom ?	Uses and Effects: Investigation could be a contribution to promote the ecological awareness to all person affected To point out the relevant consequences and/or effects of ecological system (network) on local and regional scale and assess the influence of human intervention Measures for integrated environmental compatibility and sustainability in the developed guidelines	expected results/output

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise werden darüber hinaus wesentliche und erforderliche Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung aufgezeigt (wissenschaftliche und praktische Kooperation & Kollaboration, Ausrüstung & Personal, Logistik, intaktes Meßinstrumentarium sowie Glaubwürdigkeit der Befragung muß garantiert sein), aber gleichzeitig auch Rahmenbedingungen aufgestellt (Zeitrahmen, Sicherheitsrisiken) (PIEPHO 2002). Einen Überblick über die allgemeinen Rahmenbedingungen (*general boundaries*) bietet die Quellmatrix im Anhang A 1.2.

Nach der Definition des Projektzwecks in Tab. 1.1 sind mit dem Abschnitt Strategie die Arbeitsabläufe skizziert, wobei zu den Maßnahmen in den einzelnen Kapiteln Stellung genommen wird. Zunächst werden in Kap. 2 generelle Überlegungen zur hydrologischen Simulation und Modellwahl aufgegriffen. Die physisch-geographischen Gebietsmerkmale des Untersuchungsgebiets werden in Kap. 3 diskutiert. Das Kap. 4 informiert über Modellinputdaten für die Modellanwendung (Datenerhebung). Einblicke in die algorithmischen Beschreibungen der physikalischen Gesetzmäßigkeiten vermittelt Kap. 5. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Preprocessing in Kap. 6 geschenkt (Datenverarbeitung). Kap. 7 beschreibt die Modellkonfiguration und gibt Beispiele einzelner Modellszenarien und Ergebnisse. Abschließend wird in Kap. 7.3 über den Modellstatus reflektiert, wobei über Erwartungen, Unsicherheiten und Lösungsansätze sowie resultierende Empfehlungen nachgedacht wird.

Kernpunkt dieser Studie ist die Wahl eines geeigneten Wassereinzugsgebietsmodells zusammen mit der angemessenen Datenbereitstellung und Datenverarbeitung und der angepaßten Gebietsmodellierung der Wasserflüsse.

Zur Lösung dieses Vorhabens ist das Wasserhaushaltsmodell-Paket WaSiM-ETH-Zürich (SCHULLA & JASPER 1999) ausgewählt worden. Das flächendetaillierte deterministische Modell bietet verschiedene Optionen wie alternative Algorithmen und variable Raum- und Zeitskalen sowie einen modularen Strukturaufbau an (s. Kap. 2 Abb. 2.5 Modellstruktur). Weiterhin besitzt das Modell die Möglichkeit mit GIS/ArcView verknüpft zu werden, welches am dargestellten Modellkonzept in Abb. 1.2 verdeutlicht werden soll (PIEPHO 2002). Die Ergebnisumsetzung mittels der GIS-Möglichkeiten erlaubt visuelle Interpretationen und unterstützt die Abschätzungen der Modellergebnisse, welche nötigenfalls Empfehlungsvorschläge aussagekräftig untermauern helfen.

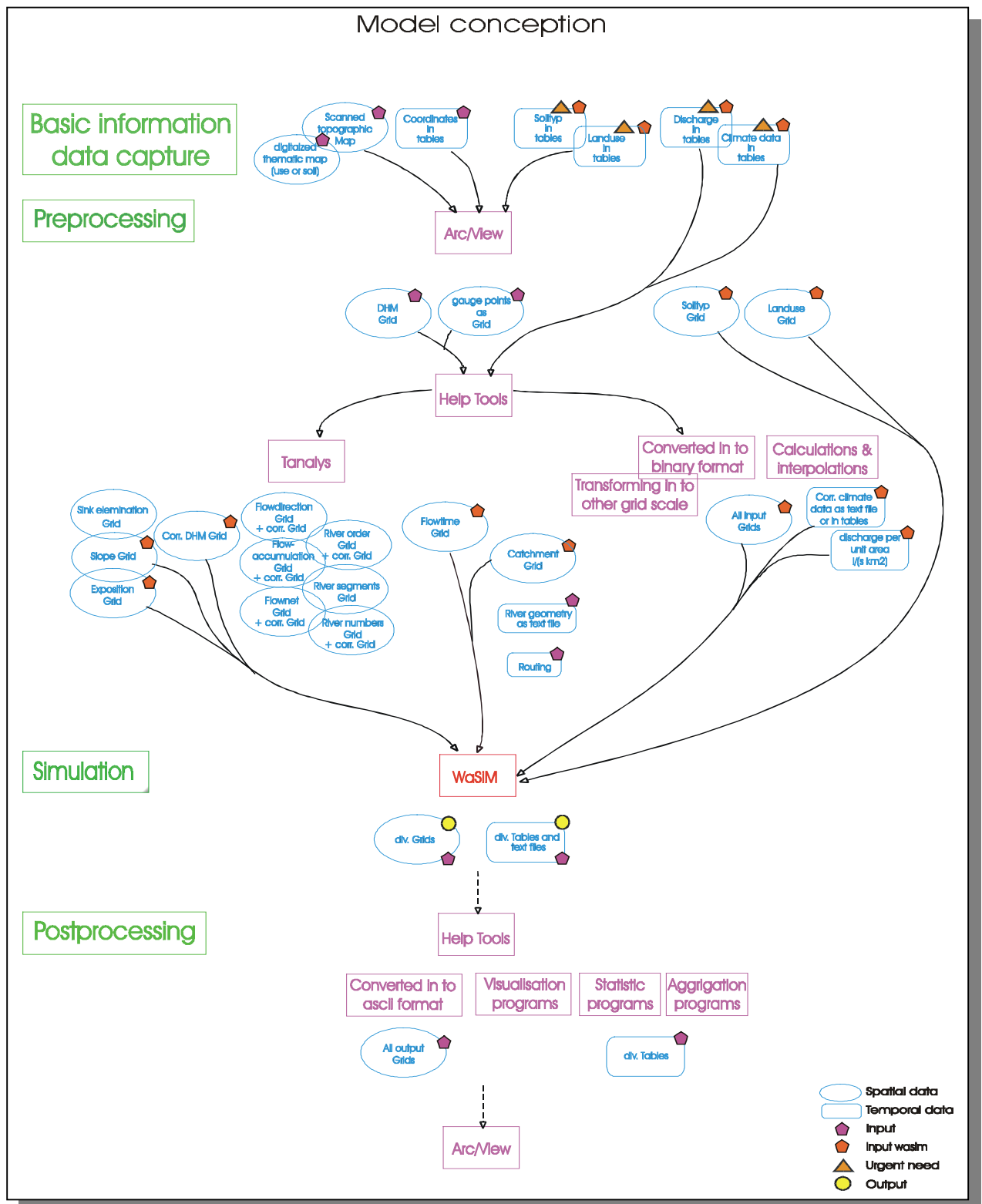


Abbildung 1.2

Das WaSiM-ETH Modellkonzept. Vorbereitung und Aufbereitung der flächenhaften Geländeinformation mittels ARC/View, Einlesen der generierten Rasterkarten (Grids-Inputs) in das Modell WaSiM-ETH, Weiterverarbeitung und visuelle Darstellung der Modelloutputs durch ARC/View

Figure 1.2

The WaSiM-ETH Model conception with connections to GIS

2 Stellenwert hydrologischer Simulationsmodelle

Moderne Forschungsansätze in der angewandten Hydrologie zeigen, daß Untersuchungsabläufe vielfach mit Hilfe von eingebauten Modellkomponenten realisiert werden und in Kombination mit herkömmlichen Ansätzen wachsende Akzeptanz gewinnen.

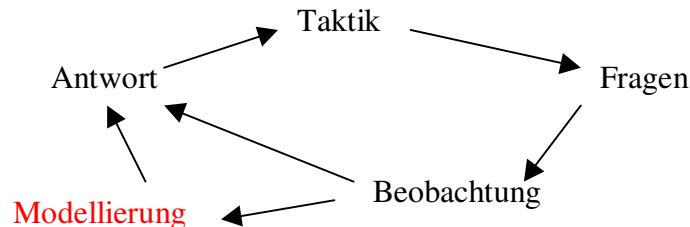


Abbildung 2.1
Figure 2.1

Forschungsablauf (nach BIERKENS et al. 2000)
Research cycle (according to BIERKENS et al. 2000)

Allgemein lassen sich Untersuchungsabläufe nach BIERKENS et al. (2000) mit Vorgehensschritten, so wie sie in Abb. 2.1 schematisch veranschaulicht sind, zusammenfassen. Auf diese Weise können jegliche Fragen zu Prozeßabläufen durch die Anwendung speziell abgestimmter oder angepaßter Modellbausteine nachvollzogen oder sogar beantwortet werden. Dieses Vorgehen verdeutlicht gleichfalls, warum gegenwärtig die Modellanwendung mit zu der angewandten Forschung in der Hydrologie gezählt werden muß.

Kerngedanke ist, daß die Verwendung hydrologischer Modelle zum besseren Verständnis des hydrologischen Systemverhalten beiträgt, indem das System durch Vereinfachung seiner Struktur simuliert werden kann, wobei die Realität idealisiert und abstrahiert wird, bis das System in seiner Funktionsweise mit Hilfe eines auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten basierenden Modells beschrieben werden kann. Die auf diese Weise gewonnenen Antworten, „*outputs*“ bezeichnet, werden umgehend zur Entscheidungshilfe benutzt oder dienen dazu, die Herangehensweisen der Forschung, Praktiken und/oder Taktiken zu definieren.

Ein derartiges Konzept zur Funktionsweise eines Systems wurde bereits von DOOGE (1973; in: HAAN et al. 1982) beschrieben und durch ein vereinfachtes Fließdiagramm in Abb. 2.2 skizziert. Bei der Vorstellung, daß jedes System aus einer Ansammlung interaktiver Komponenten besteht, die ihrerseits unterschiedlichen Inputs unterworfen sind und in Abhängigkeit verschiedene Outputs produzieren, besitzt dieser Ansatz weiterhin Relevanz. Diese Systemtheorie ist somit prozeßorientiert und produziert Outputs (Auswirkung) aus den gegebenen Inputs (Ursache). Hierbei beinhalten die Inputs die treibende Kraft (Variablen der Klimatologie und Hydrologie), die Funktionsweise des Systems wird durch spezifische Prozesse und Systemcharakteristika (Zustandsvariablen, Parameter und Konstanten) beschrieben, wobei die Natur des Systems durch Anfangs- und Grenzbedingungen repräsentiert wird.

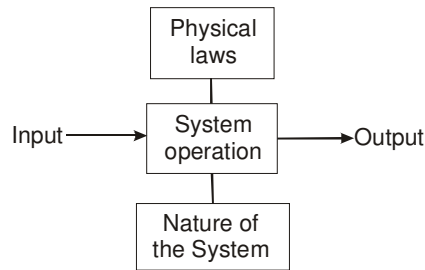


Abbildung 2.2 Das Konzept zur Funktionsweise eines Systems (von DOOGE, 1973 in: HAAN et al. 1982)

Figure 2.2 The concept of system operation (from DOOGE, 1973 in: HAAN et al. 1982)

So können mit Modellen vereinfachte Darstellungen von komplexen Systemen angenähert werden (Systemeingang – Systemfunktion – Systemausgang). Zur Umsetzung stehen sowohl physikalische, mathematische als auch analoge Modellansätze zur Verfügung.

Derzeit stellt die Modellierung in der Hydrologie ein wichtiges Forschungshilfsmittel dar und viele Hydrologen nutzen diese Gelegenheit, die jeweiligen Systemprozesse durch Modellansätze klarer zu beschreiben als zuvor. So werden sie zur Lösung wissenschaftlicher hydrologischer und angewandter ingenieurhydrologischer Probleme herangezogen und fallspezifisch mit abgestimmter Genauigkeit im Detail entwickelt, was bislang mit konventionellen Methoden oder Analysen nicht erreicht werden konnte. Heute gibt es eine große Vielfalt an Modellen, Modellpaketen und -bausteinen, die leicht verfügbar sind und miteinander kombiniert werden können.

Aktuell wird die Modellierung verstärkt in Forschungsinstitutionen, Wasserwirtschaftsämtern und anderen hydrologischen Behörden sowie Servicefirmen angewendet, wobei der Verwendungszweck des Modells hauptsächlich dem Aufgabenbereich des Vorhersagens und der Untersuchung gewidmet ist. In der angewandten Hydrologie sind neben diesen traditionellen Arbeitsfeldern aber auch andere Probleme betreffend der Grundlagenforschung oder der Systembeschreibung (BECKER & SERBAN 1990) sowie statistische Modellierung insbesondere hervorzuheben (CLARK 1994 & 1984).

2.1 Modellklassifikationen

Obwohl auf detaillierte Erläuterungen zum Prinzip prozeßorientierter Modellklassifikationen und der sich daraus ergebenden Modellstrukturen hier nicht weiter eingegangen werden soll, erscheint es dennoch angemessen, in Bezug auf hydrologische Modelle zunächst häufig verwendete Definitionen und Klassifikationen mit Hilfe der Abb. 2.3 zu erläutern. Im übrigen wird auf weiterführende Fachliteratur verwiesen (z.B.: BECKER & SERBAN; 1990; KIRKBY et al. 1992; DYCK & PESCHKE 1995 u.a.).

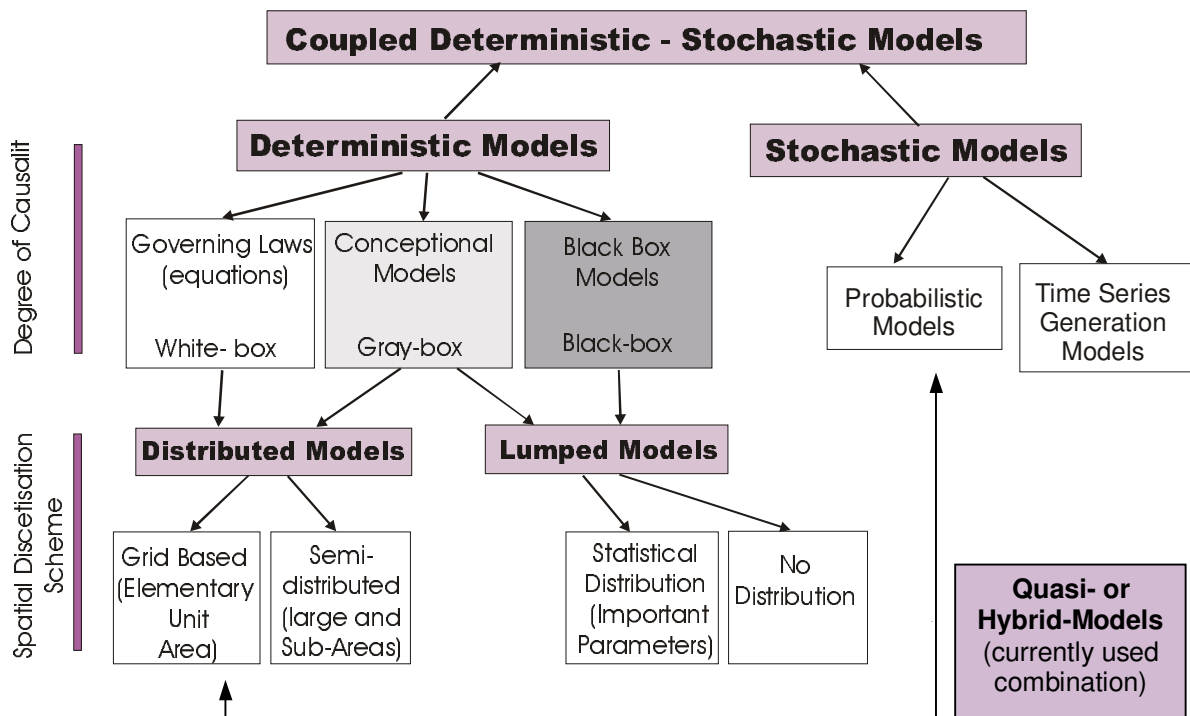


Abbildung 2.3 Klassifikationsschema hydrologischer Modelle vor dem Hintergrund der Anwendung und dem Grad des Zusammenhangs bezüglich der räumlichen Diskretisierung (in Anlehnung an: BECKER & SERBAN 1990)

Figure 2.3 Classification of hydrologic models in terms of purpose of application, degree of causality and applied spatial discretization (following BECKER & SERBAN 1990)

Wie in Abb. 2.3 illustriert wird, können deterministische Modelle jegliche Kombinations- oder Permutationen annehmen, so daß sie sowohl mit empirischen als auch mit konzeptionellen Komponenten zusammengesetzt sind.

Im Allgemeinen werden Modelle zur Untersuchung der Reaktion hydrologischer Systeme verwendet. Dabei beruht die Analyse auf der Anwendung deterministischer Betrachtungsweise. Hierbei kann die Reaktion eines hydrologischen Prozesses jederzeit auf eine Eingabe eindeutig bestimmt werden. Ein Beispiel hierzu bietet die Beschreibung der Niederschlag-Abfluß-Beziehung, indem die Abflußkonzentration mittels einer Durchflußganglinie beschrieben wird. Dieser Modelltyp zählt zu den deterministischen Modellen, die auf konzeptioneller Ebene und auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten beruhen. Andere

Modelle ermitteln das statistische Verhalten aus bestimmten Zeitreihen, wobei unabhängig vom aktuellen Ereignis vorgegangen wird. Dieser Modellansatz wird zu den stochastischen Modellen gezählt (Wahrscheinlichkeitstheorie). Beide Modelltypen, ob deterministisch oder stochastisch, haben sehr zur Weiterentwicklung der Hydrologie beigetragen.

Ferner können diese Modellansätze noch in Unterklassen eingeteilt werden (*distributed* -, *lumped* - and *semi-distributed models*). Die in die Kategorie “*distributed models*” fallenden unterteilen das Einzugsgebiet in eine Vielzahl kleiner Segmente (flächendetailliert) und arbeiten diese dann Zelle für Zelle separat ab und fassen am Kalkulationsende alle Segmente als Gebietsantwort wieder zusammen. Die in die Kategorie “*lumped models*” fallenden behandeln hingegen das gesamte Einzugsgebiet pauschal, als hätte es homogenen Charakter (flächenkonzentriert) und sie rechnen beispielsweise mit Einheitsregen und -ganglinien (Bsp. *unit hydrograph*).

Mittlerweile gibt es eine kaum mehr überschaubare Anzahl von Einzugsgebietsmodellen und es wird schwierig, eine klare Abgrenzung nach dem o.g. herkömmlichen Klassifikationschema zu ziehen (SING 1995). Generell korrespondieren heute *lumped* - und *distributed* – aber auch stochastische Modellkomponenten miteinander, und dadurch entstehen Vermischungen mit und unter den Modellbausteinen (*mixed or semi-distributed models*). Insbesondere werden gern mehr und mehr statistische Module integriert, was gerade bei der Lösung von Skalenproblemen und der Quantifizierung von Unsicherheiten bezüglich der Systemaussage dienlich sein kann (*quasi- or hybrid models*). Das Spektrum der hierzu verwendeten Modellansätze ist somit breit gefächert, wobei sich jeweils die Modelle hinsichtlich ihrer Modellphilosophien unterscheiden (reduktionistisch – holistisch, kausal – „black box“).

2.2 Hydrologische Modellentwicklung

Grundlegende Erkenntnisse zur mathematischen Beschreibung hydrologischer Prozesse wurden bereits in frühester Geschichte ausgearbeitet. Neben NEWTON und vielen weiteren herausragenden Wissenschaftlern gehören sicherlich auch LAPLACE, DARCY oder SAINT-VEANT zu den impulsgebenden Wegbereitern in der Erforschung und Beschreibung strömungs-mechanischer oder physikalisch-mathematischer Naturgesetzmäßigkeiten (FREAD 1985 und BLACKIE & EELES 1985).

Nach CLARKE's Darlegung (1973) sind erste effektive Anstöße zur umfassenden Einzugsgebietsmodellierung sehr eng mit der Entwicklung der Ingenieurhydrologie verknüpft. Diese Ansicht vertritt auch WENKEL & SCHULTZ (1999), da die angewandte heuristische Vorgehensweise noch heute mit dem Begriff ingenieurökologische Modellierung beschrieben wird. Zunächst berufen sich erste Lösungsansätze in der Hydrologie auf statistische Methoden, (Echtzeitprognosen und Vorhersagen). Später gelang es grundlegende Prozesse, wie Speicherung, Verlust und Routing, auch ausgezeichnete theoretische Überlegungen zu Verdunstungskonzepten (z.B. PENMAN-Formel u.a.), oder zu Infiltrationskonzepten (HORTAN; PHILIP. . .) und insbesondere zur Beschreibung des Bodenwassertransports (DARCY's law; RICHARDS-Gleichung) zu entwickeln, welches schließlich dazu verhalf den gesamten hydrologischen Kreislauf (Boden-Pflanzen-Athmosphäre) annähernd beschreiben zu können. In der folgenden Entwicklung wurden statistische Komponenten zunehmend mit systematischen Komponenten, den *'lumped conceptual models'*, kombiniert, (z.B. Niederschlags-Abfluß-Beziehung). In den frühen Achtzigern analysierte CLARK (1984) bereits das Wesen mathematisch-hydrologischer Modellkombinationen intensiv und würdigte hervorragende Modellentwickler, die maßgeblich die Weiterentwicklung hydrologischer Modelle prägten. Auch SING (1995) stellt rückblickend einen breit gefächerten internationalen Überblick verschiedenster Einzugsgebietsmodelle vor, die derzeit verbreitet anerkennende Verwendung finden. In anderen Veröffentlichungen, wie beispielsweise in denen der WHO-NOTES (1990) werden ebenfalls etliche Modellversionen unter dem Kürzel HOMS aufgelistet (NEMEC 1986). Des weiteren sind in FLEMMING's Beitrag (1979) allgemeine hydrologische Probleme im Zusammenhang mit entsprechenden Modellansätzen zusammen mit Entwickler-Referenzen aufgezeigt.

Gegenwärtig kann man auf mehr als drei Dekaden zurückschauen, in denen eine bemerkenswerte Entwicklung in der Entstehung und Anwendung hydrologischer Modelle stattgefunden hat. Zwar wurden die hydrologischen Modelle zunehmend umfangreicher und ausgeklügelter, doch prinzipiell hat sich in den letzten 20 Jahren die Grundstruktur eines Niederschlags-Abfluß-Modells nicht mehr großartig verändert. Die zunehmende Anzahl an Veröffentlichungen, Symposien und anderen Diskussionsrunden hinsichtlich individueller Prozeßmodellierungen, die sich speziell mit Themen zur hydrologischen Modellierung beschäftigen (z.B. Grundwasser, gesättigte und ungesättigte Bodenzone, Abflußverhalten und interaktive Prozesse im Einzugsgebiete) können diese enorme Entwicklung belegen (BUCHHOLZ 2001; LEIBUNDGUT et al. 2001; BEVEN 2000; SING 1995; CLARKE 1994; BECKER & SERBAN 1990; u. a.).

Heute sind eine große Zahl unterschiedlicher hydrologischer Modelle als *software* – Paket auf dem Markt. Durch die rapide Entwicklung moderner Netzwerkmöglichkeiten können sie schnell über den Internetzugriff als *freeware* herunter geladen werden.

Aktuell wird unter Modellierern die Frage kontrovers diskutiert, welcher Modellansatz (*distributed* oder *lumped*) schließlich bessere Ergebnisse in der hydrologischen Modellierung ergibt (BEVEN 1985; BLACKIE & EELERS 1985; BEVEN 1996 und REFSGAARD et al. 1996; CLARKE 1994). Der Versuch Modellansätze gemäß ihres Anwendungspotentials zu zuordnen ist in BECKER & SERBAN 1990 nachzulesen. Außerdem gewinnt gegenwärtig die Suche nach Lösungsansätzen zur Vermeidung von Unsicherheiten durch inadäquaten Skalentransfer zunehmend an Bedeutung.

2.3 Skalentransferproblematik in der hydrologischen Modellierung

Wie lassen sich die durch Skalentransfer ausgelöste Unsicherheiten in Modellergebnissen oder die durch Eingangsdaten und Parameter eingeschleusten Unsicherheiten verringern (BEVEN 2001)? Diese Problematik wird auch die vorliegende Einzugsgebietmodellierung begleiten. Unterschiedliche Skalentransferproblematiken zu erklären, heißt das Konzept der Skalen zu verstehen. Nach BAVEYE & BOAT (1999) beinhaltet das Konzept der Skalen folgende klare Definition: „In soil science and hydrology, as is the case in physics, ‘scale’ is taken as a synonym of ‘characteristic length’ in the spatial domain, and of ‘characteristic time interval’ in the temporal domain.”

NEMEC (1987) definierte erstmals die spezifischen Betrachtungsmaßstäbe hydrologischer und meteorologischer Prozesse (BECKER & SERBAN 1990; GURTZ et al. 1997). Anhand der Abb. 2.4 soll ein überarbeitetes Diagramm in Anlehnung an BLÖSCHL & SIVAPLAN (1995) diese hydrologischen Prozesse mit seinen charakteristischen Skalenreichweiten einordnen und den Betrachtungsmaßstab für das IPMS-Projekt lokalisieren helfen.

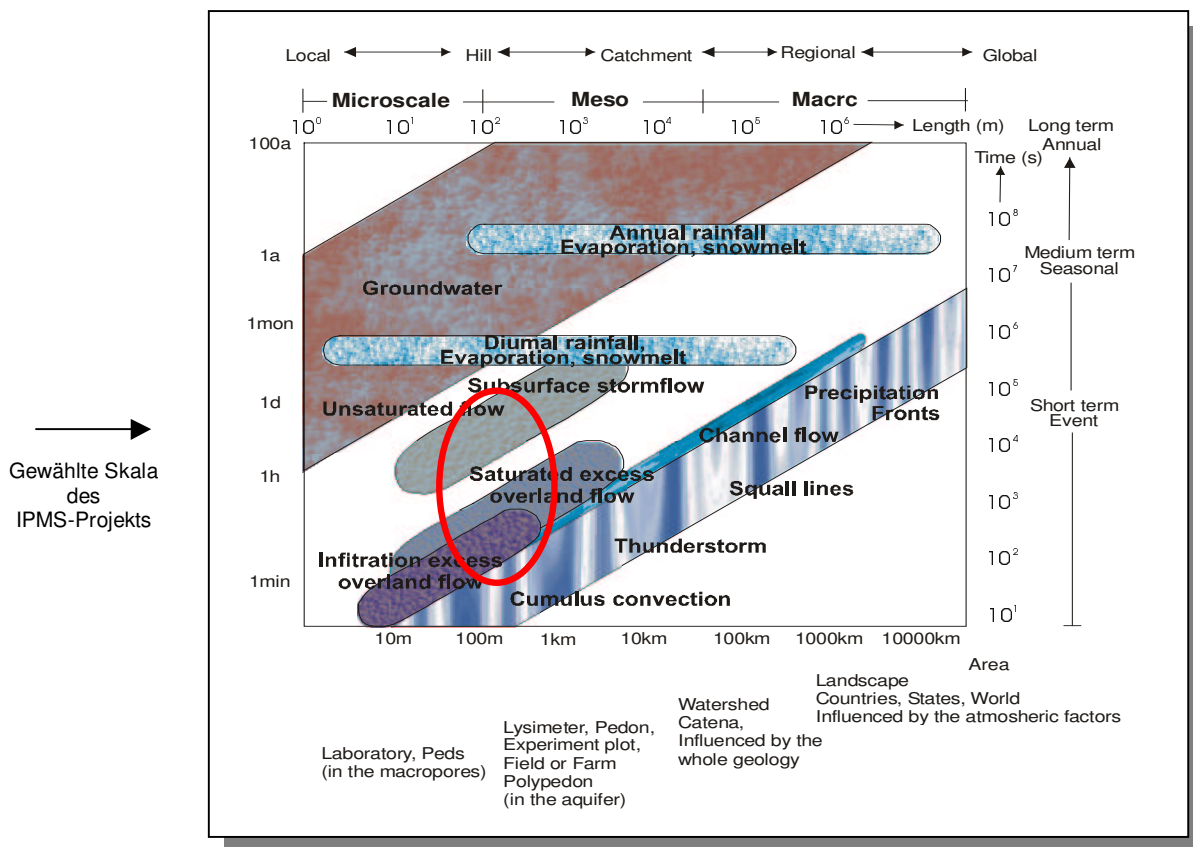


Abbildung 2.4 Betrachtungsmaßstäbe hydrologischer und meteorologischer Prozesse mit Hinweis auf gewählte IPMS-Prozeß-Skala (in Anlehnung an BLÖSCHL & SIVAPLAN 1995)

Figure 2.4 Hydrological and meteorological processes at a range of characteristic scales regarding to the IPMS-process-scale (followed by BLÖSCHL & SIVAPLAN 1995)

Die Abb. 2.4 zeigt, daß die Übergänge zwischen den Skalen miteinander interagieren und ohne scharfe Grenzen verlaufen. Für die vorgestellte Modellzielsetzung und Problemorientierung ist zu klären, innerhalb welcher Raum-Zeit-Domänen die zu beschreibenden

Prozesse im gewählten Repräsentativgebiet ablaufen können. Der Schauplatz dieser Untersuchung zählt zu einer kleineren Gebietseinheiten mit nur ca. 10 ha Einzugsgebietsgröße (*farm size - small catchment*). Die maßgeblichen Prozesse, die das Hydropedotop charakterisieren, reagieren somit relativ schnell (Ereignisskala +/-1 Tag). Der Beobachtungsmaßstab gibt vor, wie detailliert die relevanten Zusammenhänge zwischen räumlicher und zeitlicher Diskretisierung erfaßt, ob physikalische Prozeßbeschreibungen ihrerseits entweder abstrahiert oder regionalisiert werden müssen. Anhand dieser Ausgangssituation orientiert sich folglich die Modellkonzeption und die Entscheidung für eine angemessene Skala, wodurch der Umfang der Modellierung bzw. das geeignete Modellkonzept definiert werden kann.

Wissenschaftliche Erfahrungen zeigen, daß generell Beobachtung und Erfassung hydrologischer Prozesse in kleinen Skalen mehr Detailinformationen bedürfen, als hydrologische Prozesse in größeren, übergeordneten Skalen. In diesem Zusammenhang wird deutlich, daß Modellierung von der jeweiligen realen Informationsverfügbarkeit, Datendichte und Qualität abhängig ist, und in zunehmendem Maße durch die Wahl adäquater Skalentransferansätze beeinflusst wird (*linkages across scales*). Dieses gilt auch für das zu betrachtende Untersuchungsgebiet, bei dem die Systemfunktion mit einigen wichtigen, aber leider unbekannten, prozeßbeschreibenden Parametern angemessen definiert werden soll. Dabei werden Probleme innerhalb des Skalentransfers vermutet, die möglicherweise durch dürftige Prozeßinformation, begrenzte Datenverfügbarkeit, unbefriedigende Datenkonsistenz, inadäquate Aufbereitung der Rohdaten und Diskrepanzen zwischen dem Beobachtungsmaßstab und dem Computermaßstab ausgelöst werden könnten. Diese Ursachen sind oft in der natürlichen Variabilität der Prozesse und in der Heterogenität des Bezugsraums zu suchen. PLATE & DUCKSTEIN (1990) unterscheiden hierbei zwei Quellen, wie einerseits stochastische Phänomene in der hydrologischen Modellierung durch die naturgegebene Variabilität verursacht werden und andererseits stochastische Phänomene möglicherweise durch Unsicherheiten während der Simulation bedingt sind (durch: Inputs, Parameter und Modellansatz). Ein wesentliches Problem könnte auch dann auftreten, wenn es nicht gelingt die Bezugsfläche annähernd exakt zu charakterisieren und sich die Basisinformation, wie auch im Projektgebiet, nur auf eine begrenzte Anzahl an Punktmessungen festmacht, welches oft fehlerhafte Parameterabschätzung zur Folge haben kann und eine Fehlerfortpflanzung durch die ganze Simulation mit sich führen würde. Das grundlegende Problem vom Punkt auf die Fläche zu schließen ist nicht unbekannt und wird intensiv diskutiert (BIERKENS et al. 2000; WENKEL & SCHULZ 1999; BEVEN 1996; REFGAARD & ABBOT 1996; BLÖSCHL & SIVAPELAN 1995, WOOD et al. 1990, u.a.). Außerdem ist nicht zu vernachlässigen, daß auch bei der Bestimmung von Zustandsvariablen für die Bodencharakteristik unterschiedlichste Pedotransferfunktionsansätze Verwendung finden, wobei diese Schätzungen ebenfalls mit großen Unsicherheiten verbunden sind (HENNINGS & MÜLLER 1997; TIETJE & TAPKENHINRICHS 1993). Nach PLATE (1992) sind Modellausgang und -eingang eng durch die Systemeigenschaften verknüpft, denn die Variabilität des Eingangs wird im wesentlichen durch die Variabilität des Ausgangs bestimmt. Auch MORGEN (1999) vertritt diese Ansicht: „wenn viele der Eingabedaten Fehler in Höhe von $\geq 10\%$ enthalten, ist es unrealistisch zu erwarten, daß das Model Vorhersagen mit $\leq 5\%$ Genauigkeit treffen kann“ (MORGAN 1999).

Da gegenwärtig zunehmend unterschiedlich geeignete Regionalisierungsoperationen (Übertragungsregeln, -funktionen) entwickelt und getestet werden (BIERKENS et al. 2000; WEINGARTNER 1999), wird auch diese Arbeit auf äquivalent abgeleitete Parameter zurückgreifen müssen. Denn schon jetzt zeigt sich in vielen Arbeiten deutlich, daß durch Einbeziehung verschiedenster Algorithmen bessere räumzeitliche Abstraktionsniveaus erreicht werden können.

2.4 Modellauswahl

Wichtig ist einen geeigneten Modellansatz zu wählen, welcher in der Lage ist die komplexen Prozeßstrukturen zu erfassen und zu beschreiben. Um hierfür Orientierung zu geben und dabei das Projektvorhaben gezielt einzukreisen, wurde als Entscheidungshilfe eine spezielle Hilfsmatrix (*decision support system*) entwickelt. Dieses geschah vor dem Hintergrund, den Sachverhalt des gegenwärtigen Projektstatus und die daraus resultierende Machbarkeit klar aufzuzeigen und zu bewerten. Die angestrebte Grundidee (Ziel), sowie alle einflußnehmenden Systemcharakteristika und Rahmenbedingungen (Indikatoren und Aspekte) geben dabei vor, welche Umsetzungsmöglichkeiten und Erfolgsaussichten zu erwarten sind. Diese Herangehensweise verhilft, an Hand einer zuvor erarbeiteten Scheckliste (s. Projektinventarisierung im Anhang A 2.1), wesentliche Argumente auszuarbeiteten und zu extrahieren, welches dem bereits in der Einleitung vorgestellte ZOPP-Verfahren ähnelt. Das Ergebnis zeigt die Tab. 2.3 Matrix zur Entscheidungshilfe, in der Zielorientierung, aktuelle Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet und grundlegende Rahmenbedingungen in zusammengefaßter Form hervorgehoben werden.

<i>Supposed to be</i>	<i>Actual conditions</i>
Objective (1) <ul style="list-style-type: none"> To describe the major physical processes in the individual parts of hydrological cycle 	Landscape complexity <ul style="list-style-type: none"> high
Process (2) <ul style="list-style-type: none"> Water balance Rainfall-runoff relationship 	Hydrologic system <ul style="list-style-type: none"> non-linear, heterogen
Model set-up (3) <ul style="list-style-type: none"> Temporal and spatial resolution (events and seasonal, grid scale not to small) 	Signature <ul style="list-style-type: none"> Regime curve (discharge), specific parameter, ...
Model approach (5) <ul style="list-style-type: none"> Physical based Conceptual, modular and semi-distributed Incorporated uncertainties 	Driving forces (availability of rules, variables and arguments..) <ul style="list-style-type: none"> temperature, precipitation, humidity, wind, ...
	Boundaries (6) <ul style="list-style-type: none"> High uncertainties (time frame, acts of God...)
	Feasibility's (4) <ul style="list-style-type: none"> medium to limited (data capture)
	Means and facilities <ul style="list-style-type: none"> high (logistic, measurement devices, lab,...)

<i>Judgement</i>
<ul style="list-style-type: none"> High constraints Parameterization and validation becomes tricky High uncertainties have to be taken into account Challenge

[Nos.: 1 purpose, 2 process, 3 spatial and temporal frame, 4 data availability, 5 requirements and 6 expenditure of energy]

Tabelle 2.3 Matrix zur Entscheidungshilfe
 Table 2.3 Status-feasibility matrix

Jede aufgelistete Kategorie ist hier als übergeordneter Sammelbegriff zu verstehen. Sie setzt sich aus verschiedenen aktuell gegebenen Konditionen zusammen. In Wirklichkeit verbirgt sich dahinter eine Anzahl zusätzlicher Gebietsinformationen und Details (Ausgangsscheckliste zur Projektinventarisierung im Anhang A 2.1). So beinhaltet beispielsweise der Aspekt Landschaftskomplexität als Sammelbegriff die Geomorphologie, den gesamten biotischen Komplex und natürliche oder von Menschen bedingte Eingriffe sowie Zerstörungen. Hinter dem Aspekt Hydro-ökosystem verbergen sich Informationen über die Art des Systems (linear oder nicht-linear, homogen oder heterogen, offenes oder

geschlossenes System u.s.w.). Zu den Indikatoren Signatur und antreibende Kraft zählen die Zustandsvariablen und Parameter, die das Ökosystem charakterisieren oder steuern und die schließlich als Daten zur Verfügung stehen sollten.

Die hervorgehobenen Leitkategorien [Nr. (1) – (6)] definieren:

angestrebtes Ziel, zu beschreibender Prozeß, zweckmäßige zeitliche und räumliche Auflösung, Datenverfügbarkeit, resultierender angepaßter Modellansatz und schließlich Zeit- und Energieaufwand.

Aus dem Status ist zu erkennen, daß das Aufgabenziel einschränkenden Rahmenbedingungen ausgesetzt ist (s. Nr. 6 *boundaries*), welche möglicherweise zu Unsicherheiten führen könnten (politische Unruhen, zu kurze Projektdauer, begrenzte Datenverfügbarkeit und schließlich vorzeitiges Abbrechen der Meßkampagne u.s.w.), was während der ganzen Projektdurchführung in Betracht gezogen werden sollte. Die Interaktionen (Ursache und Wirkung) zwischen den Kategorien Nr. 1 – 6 erscheinen zunächst stabil. Beobachtungen in anderen Studien haben aber bereits gezeigt, daß das hydrologische System nicht linear reagiert (SCHUMANN 2002) und zudem das bewässerte Einzugsgebiet (Khet-Land) durch einen externen Zulauf als offenes System einzustufen ist (s. Kap. 4.1.1). Darüber hinaus ist mit hoher naturgegebener Variabilität in der Bodenbeschaffenheit zu rechnen, welches zu Parametervarianz führen könnte (s. Kap. 4.2.2). Aufgrund dieser Einschätzung werden Parameterermittlungen und Modellvalidierung als relativ komplex und extrem zeitaufwendig eingeschätzt.

Zur Lösung der Fragestellung bei gegebener Sachlage bietet sich ein deterministisches flächendetailliertes Modell an, welches eine modulare Struktur aufweist (vgl. Tab. A 2.1). Im ersten Schritt wird ein angemessener und dennoch genügsamer Ansatz verfolgt. Daraus ergibt sich, daß die Modellkonfigurierung nur so komplex aufgebaut sein sollte, wie unbedingt notwendig, um die sog. Signaturen des Systems beschreiben zu können, denn der Rahmen und die gegebenen Skalen legen diese Strategie nahe.

Die Konsequenz ist, daß man sich zunächst nur auf die Prozesse des Niederschlag-Abfluß-Verhaltens innerhalb des kleinen Khet-Einzugsgebietes konzentriert, wobei es unumgänglich sein wird, innewohnende Prozesse zu beschreiben.

Eine Kombination aus konzeptionellem und physikalischem Ansatz ermöglicht, die Prozesse Schritt für Schritt zu beschreiben. Der Vorteil, ein modular aufgebautes Modellpaket zu nutzen, liegt darin, eine gewisse Flexibilität bei der Handhabung zur Verfügung zu haben. Die Datenanforderung kann je nach gewähltem Konstellationsniveau (*model set-up*) angepaßt werden. Bei wachsender Erkenntnis bezüglich der Eingangsdaten können zusätzliche Module hinzu geschaltet und angepaßt werden. Auf diese Weise wird ermöglicht, detaillierter zu forschen.

Schließlich wurde die Entscheidung getroffen, das Wasserhaushaltsmodell-Paket WaSiM-ETH-Zürich (SCHULLA & JASPER 1999) zu wählen, welches verschiedene Anwendungsoptionen über alternative Algorithmen und variable Raum- und Zeitskalen anbietet.

In Anbetracht der Wahl der Modellkonfigurationen soll der physikalisch basierende Ansatz getestet werden. Das Modell ermöglicht eine räumliche Diskretisierung der Prozeßabläufe. Außerdem können die Ergebnisse des Oberflächenabflusses, der Verdunstung und der Bodenwasserbilanzen in thematische Karten transformiert und mittels GIS/ArcView visualisiert werden

2.5 Modellstruktur WaSiM-ETH

Die Abb. 2.5 zeigt schematisch den Aufbau des Einzugsgebietsmodells WaSiM-ETH (**Waterbalance Simulation Model** — SCHULLA & JASPER 1999), welches an der ETH-Zürich entwickelt wurde. Das Modellpaket wurde bereits in den Alpen für verschiedene Makroskalen in unterschiedlichen Einzugsgebieten getestet (GURTZ et al. 1997; SCHULLA & JASPER 1999; (www.iac.etz.ch/map-doc/NL7/RaphaelProjekt.htm)). Eine Übertragung auf die Bergländer der Himalaya-Region ist gerechtfertigt, da im Rahmen des Alpenen Programms RAPHAEL und anderer EU Forschungsprogramme Wissenschaftler der ETH-Zürich einige Modellstudien insbesondere in gebirgigem Gelände durchgeführt und mittels prozeßbezogener Experimente Verbesserungen in den Modellkomponenten und in der Parametrisierung erzielt haben (SCHULLA 1997). Das Modell bietet verschiedene Module (Modellkomponenten) an, so daß es möglich wird neben der Wasserbilanz eines Einzugsgebietes auch substantielle Prozesse wie Evapotranspiration, Inzeption, Infiltration, Schnee- und Gletscherschmelze, Bodenfeuchtigkeit, Grundwasserneubildung sowie Speicherung und Oberflächenabfluß aus einzelnen Systemen zu simulieren. In dieser Studie soll sich das WaSiM-Modell erstmalig an einem sehr kleinen Einzugsgebiet (meso- bis mikroskalen Raum) bewähren, was laut SCHULLA „Modellanwendungsneuland“ bedeuten würde (mündl. Mitteilung des Modellentwicklers).

Anfänglich wurde das Modell von SCHULLA (1997) auf der Basis des konzeptionellen TOPMODEL-Ansatzes (BEVEN & KIRKBY 1979) zusammengesetzt. Die neue Version 2, welche jetzt den physikalisch basierten RICHARDS-Ansatz beinhaltet, enthält zusätzliche Module (SCHULLA & JASPER 1999). So wird es möglich, den Wasserfluß im ungesättigten Bodenprofil zu beschreiben. Ein Grundwasser- und ein gelöstes Bodenwassertransportmodul wurde eingeführt und außerdem bietet die neue Modellversion die Möglichkeit Bewässerungsgaben oder Drainagesysteme zu berücksichtigen. Eine wesentliche Verbesserung bietet jedoch die Komponente des gelösten Bodenwassertransportes.

Das Modell ermöglicht weitergehende Anwendungsbereiche. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in Nepal verwandten hydrologischen Modellkomponenten sind in der Abb. 2.5 farbig hervorgehoben: Evapotranspiration-, Interzeption-, Infiltration-, Bodenfeuchte- und Abflußmodule. Das Gletschermodule und die Schneeakkumulation sowie die Tauprozesse sind in dieser Arbeit nicht relevant, da sich das Einzugsgebiet in dem Mittelgebirge der Himalaya Region befindet (vgl. hierzu Kap. 3.2). Auch auf das Grundwassermodul könnte verzichtet werden, da neue Erkenntnisse im Projektgebiet den Grundwasserkörper als nicht zusammenhängend identifiziert haben (SCHUMANN 2002). Nur temporäre Wasserlinsen treten saisonalbedingt als schwebende hochvariable Grundwasserleiter auf, verkleinern sich dann aber während der Trockenzeit wieder (episodische Grundwasserlinsen). Die Möglichkeit, das Grundwasser- und das gelöste Bodenwassertransportmodul zuzuschalten besteht dann, wenn innerhalb des interdisziplinären Forschungsvorhaben zusätzlich weitere Forschungserkenntnisse bezüglich der Chemie und des Grundwasserkörpers gewonnen werden.

Dieses Modellpaket zählt zu den *‘semi-distributed deterministic models’* und setzt sich wie folgt zusammen:

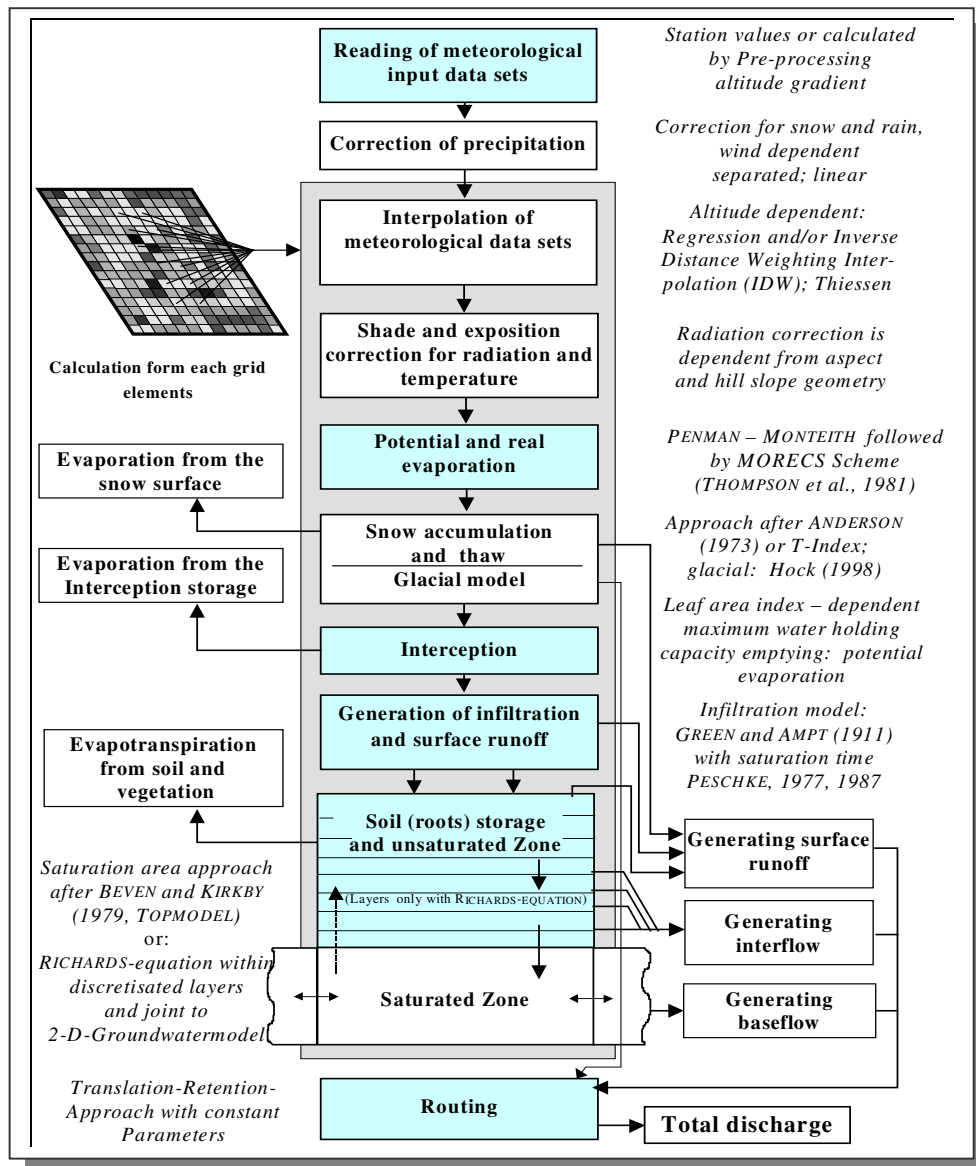


Abbildung 2.5 Die Modellstruktur des WaSiM-ETH Modells (SCHULLA & JASPER 1999)
Figure 2.5 Model structure of the WaSiM-ETH model (SCHULLA & JASPER 1999)

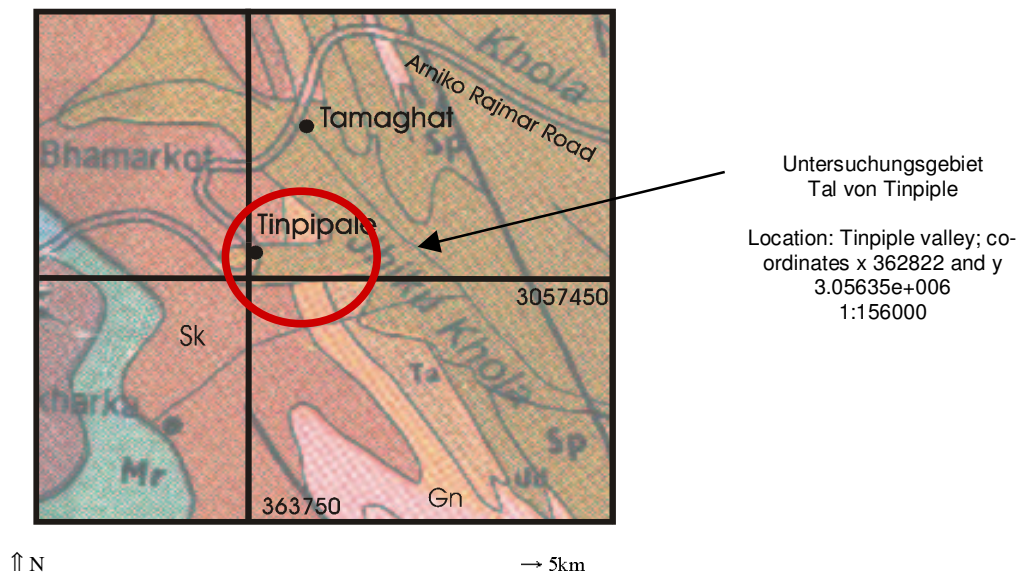
Die Entscheidung, das WaSiM-ETH-Modellpaket zu verwenden, erscheint sinnvoll, denn gerade die komplexe Prozeßbeschreibung ermöglicht eine räumliche Diskretisierung der hydrologischen Prozesse im Zielgebiet und kann auf diese Weise realistische Ergebnisse für das Forschungsvorhaben bieten. Außerdem ist ein Vergleich der unterschiedlichen Modellansätze (RICHARDS-Gleichung oder TOPMODEL-Ansatz) bedenkenswert, da beide Prozeß-beschreibungen eine räumliche Diskretisierung erlauben.

3 Geographische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

3.1 Geomorphologischer Formenschatz, Boden und Gewässer

Das Untersuchungsgebiet befindet sich innerhalb der Hindu Kush Himalaya Region (HKH) in Nepal, 40 km nordöstlich von Kathmandu im *Kabhre Panalchok* Distrikt. Detaillierte Einblicke über orogenetische und tektonische Hintergründe, die zum Aufbau des Himalayas geführt haben finden sich in GANSSE 1964; MOLNAR 1986; SHARAN 1990 und STANLEY 1995. In der geologischen Fachwelt wurden in der Vergangenheit verschiedene Ansätze zur stratigraphischen und lithotektonischen Gliederung des Himalayas diskutiert, wobei sich MOLNARS Gliederung in sechs geologische Einheiten durchgesetzt hat. Dem zufolge wurde diese Untersuchung im *Lesser* bzw. *Lower Himalaya* durchgeführt, der vereinzelt Bergkuppen mit Höhen zwischen 800 m und 2100 m aufweist. An höheren und steileren Hangbereichen werden erosionsgefährdete Flächen ausgemacht, die potentielle Degradierung dieser bereits entwaldeten Zonen, die im Zusammenhang mit dem wachsenden Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen stehen, muß sehr ernst genommen werden (PRASAI 2001).

Der *Lower Himalaya* ist präkambrischen und paläozoischen Alters (RANA 1984). Ein Ausschnitt aus der geologischen Karte zeigt die genaue Position der untersuchten Region (Abb. 3.1 Ausschnitt aus der geologischen Karte).



Legend:

Sk - Sarung khola formation - Fine grained dark green grey biotite and quartzitic mica schist occasionally garnetiferous interbedded with impure strongly micaceous quartzites; **Ta** - Tawa khola formation - Coarse grained dark grey garnetiferous muscovite biotite quartz schist interbedded with greyish impure quartzites pandrang quartzite member light green quartzites; **Sp** - shiprin khola formation - Coarse crystalline highly garnetiferous muscovite biotite quartz schist quartzites green chlorite schists at the base

Abbildung 3.1

Ausschnitt aus der geologischen Karte (RANA 1984; Geological Map of Central Nepal; Dep. of Mines and Geology Scale 1 : 250000)

Figure 3.1

Clip of geological map of *Central Nepal* shows the location the small catchment of Tinipale - investigation area (RANA 1984; Geological Map of Central Nepal; Dep. of Mines and Geology Scale 1 : 250000)

Das dominante Ausgangsgestein im Tinpile Tal ist durch die Signaturen Sp, Sk und Ta gekennzeichnet (s. Legende in Abb. 3.1). Der geologische Untergrund des Testgebietes setzt sich aus einer heterogenen Mischung von Quarziten, vereinzelt Granitlinsen sowie Glimmerschiefer-Komponenten (Biotiten, Muscovit) zusammen. Das Leitgestein ist der Biotit bzw. der verwandte Phyllit.

Da die Gesteinscharakteristik Einflüsse auf die Bodengenese mit all ihren spezifischen Verwitterungsprozessen besitzt, wurden für genauere Analysen vor Ort typische Gesteinsproben entnommen, die als charakterisierendes Gestein (*Index Rocks*) dienen sollen. An der TU-Braunschweig konnten im Labor Analyseergebnisse gewonnen werden, die das Gestein in die Familie der Glimmerschiefer einordneten und als Biotitschiefer ansprachen, womit es zu der Amphibolitfazies gehört (Analysebericht aus dem Mineralien Kabinett der Technischen Universität Braunschweig von Prof. REINCH und Laboranalyseauswertungsbericht MEYER). Darüber hinaus wurde der Tonmineralbestand mittels einer Röntgenographischen Untersuchung qualitativ bestimmt. Die Tonfraktion besteht hauptsächlich aus den Tonmineralen Muskovit, Illit, Kaolinit und mit geringerem Anteil aus Smectit. Die intensive Rotfärbung einiger Sedimente ist auf Oxidation von Eisen(hydr)oxiden zurückzuführen. Die gewonnenen Ergebnisse korrespondieren gut mit der geologischen Karte (vgl. Legend der Geological Map of Central Nepal in Abb. 3.1) und stimmen darüber hinaus mit den geologischen Interpretation von GANSSER (1964) und SHARAN (1990) überein. Auch über indirekte Bestimmungen entsprechend relevanter Bestimmungsschlüsse konnten ähnliche Ergebnissen erzielt werden (JUBELT & SCHREITER 1987).

Um die Erkenntnisse der Petrographie auf die örtliche Pedologie zu übertragen und schließlich hieraus eine Bodencatena ableiten zu können (flächenhafte Bodenklassifizierung), bedurfte es jedoch genauerer Feld- und Laborstudien, auf die in Kap. 4.2.2 und 6.2 eingegangen wird. Dort wird zur Ableitung derjenigen Bodenkenngößen, die für die hydrologische Einzugsgebietsuntersuchung als Modellparameter aufgenommen werden müssen, Stellung genommen (z.B. Matrixzusammensetzungen, Wasserspeichervermögen, Infiltrationsraten und hydraulische Leitfähigkeiten).

Ferner sind Erkundungen zum Grundwasserkörper durchgeführt und Grundwasserstände aufgezeichnet worden (SCHUMANN 2002). Hierzu wurden im Umfeld des Testgebiets insgesamt 51 Handborungen (11/2") niedergebracht. Im Khet-Einzugsgebiet stellte sich heraus, daß der Oberboden vorwiegend als grundwasserferner typischer Anthrosol charakterisiert wurden, wobei saisonal hoch variable, unabhängige Grundwasserlinsen lokalisiert wurden. Die gezogenen Bohrkerne dienten zur Texturansprache (Kap. 4.2.2). Weiterhin wurden vier Bodenprofile aufgenommen und ungestörte Stechzylinderproben aus verschiedenen Tiefen für detaillierte Laboranalysen entnommen (mehr dazu in Kap. 6.2).

Erkenntnisse, die hinsichtlich detaillierter Bodenklassifizierungen innerhalb der Hindu Kush Himalaya Region aus Literaturrecherchen entnommen wurden, sind nicht ohne weiteres übertragbar, da sie nicht flächendeckend vorliegen oder zu grobmaßstäbig generalisiert sind. Probleme können zudem durch unterschiedliche Klassifikationssysteme auftreten. So überschneiden sich die Bodensystematiken der USA mit denen der FAO-UNESCO. Die FAO Weltbodenkarte zeigt beispielsweise 25 allgemeine Bodentypen für die ganze Himalaya Region an (FAO 1977, *the FAO-soil map of Hindu Kush-Himalaya*). Die FAO-UNESCO ordnet allgemein die Böden der Himalaya Region zur Gruppe der Cambisols, bzw. in Untergruppen der Alfisole, Ultisole und Molisole (ISRIC). PANDAY (1995) beschreibt die Böden der 'Middle Mountains' gemäß der U.S. Soil Taxonomy als *Ustochrepts*, *Ustorthens* und *Ustifluent*. WYSS (1993) berichtet über ein Forschungsprogramm mit dem Ziel einer

systematischen Bestandsaufnahme der Bodensituation. Böden in Gegenden mit ungenügender Information werden über spezifische Kennzeichen (Klima, Vegetation, Exposition) abgeleitet und allgemein den Lithosolen, Humic Cambisolen oder Dystric Cambisolen zugeordnet. MAHARJAN (1988) liefert wertvolle Information bezüglich der Bodenaufnahme des Jhikhu Khola Einzugsgebietes, welche das gesamte übergeordnete Flußnetzsystem des Testgebietes umfassend beschreibt. Mit Hilfe von GIS und auf Basis verschiedener physikalischer Informationen, die aus Luftbildinterpretationen gewonnen wurden (Landnutzungsformen, Höhenlinienintervalle, biophysikalische Zonen, Klimazonen), konnten Bodenkarten abgeleitet werden. Die Arbeit von SHAH (1995) ist erwähnenswert, da sie anhand einfacher Befragungen der ländlichen Bevölkerung unterschiedliche Bodenklassifikation ableitet. Die Inhalte der Fragen bezogen sich auf die Bodenfarbe, -textur, -konsistenz, -tiefe und Fruchtbarkeit, aber auch Position, Neigung, Terrassentyp und Landnutzungspraktiken. Außerdem wurden einheimische Landnutzungsbezeichnungen und Erfahrungen mit einbezogen (z.B. *Khet-irrigated land* / *Bari-rainfed land*), welche sich in allgemeingültige wissenschaftliche Klassifikationsschemen übertragen lassen.

Im bewässerten Khet-Gebiet erscheint es gerechtfertigt, den Boden als Anthrosol (FAO/Unesco) zu bezeichnen, denn bedingt durch ständige Bewirtschaftung und wiederholte Erneuerung der Terrassenanlagen ist der Boden nicht mehr in seiner ursprünglichen Form erhalten, sondern tief umgearbeitet worden. Diese Zuordnung läßt sich durch aufgefundene Holzkohlereste in Bodentiefen ≥ 1.20 m belegen, was durch Brandrodungsaktivitäten in der Vergangenheit zu erklären ist.

Die Betrachtung des Tinpipe Einzugsgebietes bedarf einiger Anmerkungen zum fluvialen Formenschatz und seiner Einordnung im gesamten Flußnetzsystem.

Das hydrologische Untersuchungsgebiet nahe Tinpipe bildet die kleinste Flußordnungseinheit im gesamten Jhikhu Khola Flußnetzsystem. Betrachtet man die Formgebung der Abflußwege (Dränagesysteme) im *Jhikhu Khola* Flußnetzsystem mit seinen Seitenarmen, kann man auf die Verwitterungshärte des geologischen Untergrunds zurückschließen. Das gesamte Flußnetz ist dendritisch ausgebildet und läßt sich nach seinem Ursprung als ein insequentes Stromnetz mit perennierender Wasserführung klassifizieren. Für die Untersuchung wurden zunächst zwei kleine, dicht benachbarte Zuflüsse des Jhikhu Khola Flußnetzsystems ausgewählt. Ihr Einzugsgebiet umfaßt eine Fläche von ca. 10 ha bzw. 12 ha. Die Einzugsgebiete befinden sich in einer Höhe von 870 m bis 1100 m ü.NN. Der Abfluß des Bachs im Khet-Land orientiert sich von West nach Ost (W-E), der des Bari-Lands verläuft von Nordwest nach Südost (NW-SE) (s. Abb. 3.2).

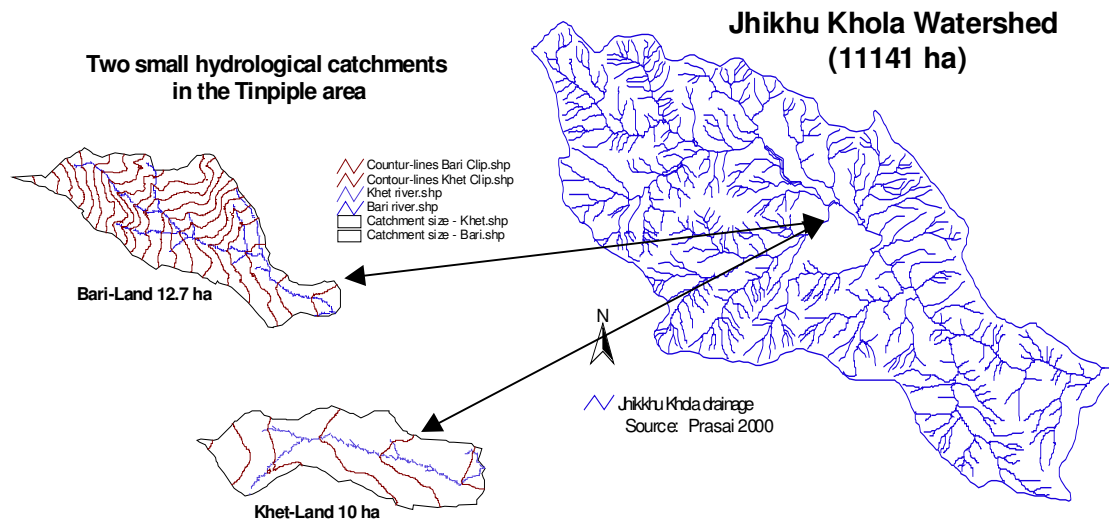


Abbildung 3.2 Hauptflußnetz Jhikhu Khola mit dem Untersuchungsgebiet im Khet-Land und dem Referenzgebiet im Bari-Land (Quelle: PRASEI 2000 verändert)
Figure 3.2 Main river net of Jhikhu Khola with the investigation area in the Khet- land and the reference area in the Bari-land (source PRASEI 2000 modified)

Die beiden Untersuchungsgebiete unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Landnutzung, wobei sich die Untersuchung hauptsächlich auf das Khet-Land konzentrieren wird, das in einem etwas niedriger und flacher gelegenen Tal durch Bewässerungslandbau beeinflusst wird. Hingegen besitzt das höherer und etwas steiler gelegene Vergleichsgebiet im Bari-Land nur vereinzelt Terrassenansätze und wird durch Regenfelddbau gekennzeichnet. Bevor die beiden ausgewählten Bäche zum *Jhikhu Khola* Fluß strömen, fließen sie erst in einen Nachbarmarm, dem *Okhar Khola* Fluß höherer Ordnung, der schließlich kurz darauf in den Hauptfluß *Jhikhu Khola* einmündet. Die Flußlänge des Khet-Bachs beträgt ca. 680 m, die des Bari-Bachs ca. 770 m.

3.2 Klimatische Einordnung anhand meteorologischer und hydrologischer Betrachtung

Das Klima Nepals läßt sich laut LAUER & FRANKENBERG (1987) allgemein als: subtropisch, kontinental und semi-humid klassifizieren [B2sh]. Dieses ist dadurch bedingt, daß sich die Hindu Kusch-Himalaya Region und somit auch das Land Nepal innerhalb des subtropischen Klimagürtels der nördlichen Hemisphäre befindet.

Das wechselfeuchte Klima wird durch den Einfluß des tropischen Monsuns geprägt, wobei im halbjährigen Rhythmus die wechselnden Hauptwindrichtungen durch unterschiedlichen thermischen Vertikalaufbau und dadurch entgegengesetzte hygrische Eigenschaften gekennzeichnet sind (Verlagerung der innertropische Konvergenz/ITC). Daher ist der bei diesem Projekt betrachtete Raum Nepals durch den annuellen Wechsel zwischen Südwestmonsun im Sommer (Regenzeit) und Wintermonsun (Trockenzeit) geprägt.

Die Regenzeit wird durch den Südwestmonsun im Juni-Juli eingeleitet und schwächt sich zum Oktober hin wieder ab. Die Dauer der Regenzeit hält im Südwesten Nepals kürzer an als in den südlichen bzw. östlichen Landesregionen. Die saisonale Verteilung des Niederschlags von West nach Ost variiert verhältnismäßig stark, ist aber geprägt durch Zunahme der Regenmengen von West nach Ost. Ab Oktober bis Mai ist Nepal wieder einer ausgedehnten Trockenperiode ausgesetzt. In dieser Zeit sind die Winterregenereignisse sehr gering und variabel. Regional betrachtet ergeben sich in den *Middle Mountains* Zentral Nepals jährliche Niederschlagsmengen von etwa 1500 mm bis 2500 mm, nach Westen hin etwas geringer werdend mit 1000 mm bis zu 1500 mm. Allgemein gilt für jedes nepalesische Tal, daß der Niederschlag mit zunehmender Höhe bis zu 2500 m ü.NN ansteigt, darüber hinaus aber abnimmt. Nach MANANDHAR & SHAKYA (1996) ergeben sich für diese Region etwa folgende jährliche Anteile der Niederschlagsverteilungen: Prämonsun 2-20 %, Sommermonsun 79-92 %, Postmonsun 1-11 % und Winterzeit 2-9 %.

Der Untersuchungsstandort im Tinpile Tal befindet sich innerhalb des Jhikhu Khola Einzugsgebiets (Untereinheit siehe Jhikhu Khola Abflußregimen in Abb. 3.2). Da die Datengrundlage für das Modellgebiet noch relative jung ist, liegt es nahe, auf mesoskalem Maßstab ähnliche Einzugsgebiete zu identifizieren und dort auf vorhandene langjährige Reihen zurückzugreifen oder, wenn notwendig, flächenmäßige Disaggregationen (*downscaling*) von übergeordneten Meßstellen auf das sehr kleine Untersuchungsgebiet vorzunehmen.

Dazu wurde eine hydrologische und meteorologische Studie von dem übergeordneten Hauptflußsystem Jhikhu Khola verwendet (ICIMOD 1998), um einen regionalen Eindruck bezüglich der Niederschlagsverhältnisse zu bekommen. Abb. 3.3 zeigt die jährliche und monsunale Verteilung des Niederschlags während Juni bis September 1997 im Jhikhu Khola Einzugsgebiet.

An den Untersuchungsstandorten Tinpile und Tamaghat fallen demnach während eines Sommermonsuns ca. 700-800 mm Niederschlag. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt ca. 1000 mm (s. Niederschlagsisohyete im Jahr 1997 in Abb. 3.3). Eine langjährige Beobachtungsreihe des Niederschlags von 1971–1996 in Abb. 3.5 zeigt, daß für Tamaghat ein Jahresdurchschnitt von 1250 mm Niederschlag ermittelt wurde.

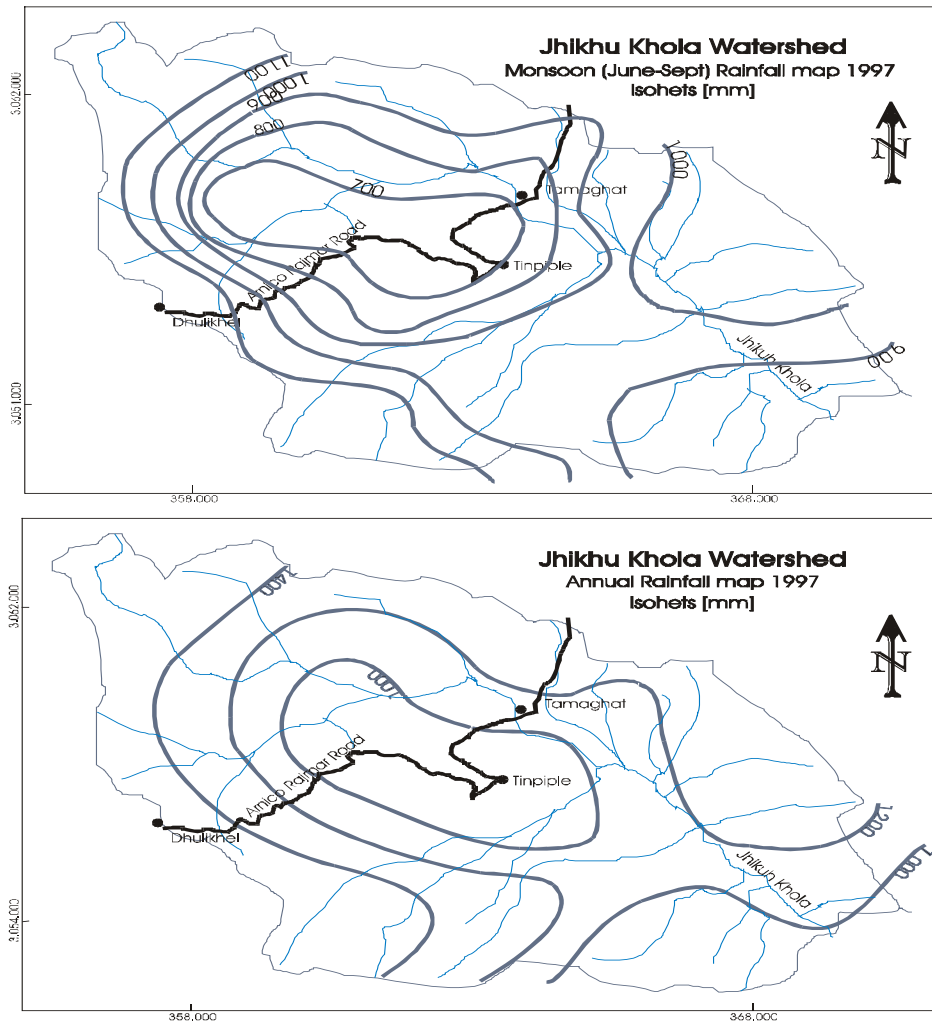


Abbildung 3.3 Monsunale Verteilung des Niederschlags während Juni bis September 1997 und jährliche Verteilung des Niederschlags im Jhikhu Khola Einzugsgebiet (Quelle: ICIMOD, 1998 verändert).

Figure 3.3 The annual rainfall distribution and the monsoon sequence during June–Sept. (Source: modified according to ICIMOD, 1998)

Für hydrologisch statistische Analysen zur Überprüfung der Datengüte (Konsistenz und Homogenität) wurden Zeitreihen mit ausreichender Länge von Klimastationen außerhalb des Projektgebietes herangezogen. Referenzdatensätze stehen somit von der Klimastation Tamaghat des Dept. of Hydrology and Meteorology (DHM) zur Verfügung, das am Jhikhu Khola Fluß liegt und in ca. 2 km nordöstlicher Richtung nur durch einen Bergrücken vom Untersuchungsgebiet Tinpile getrennt ist. Aus meso- oder makroskaler Sicht kann allgemein davon ausgegangen werden, daß die Klimadaten Tamaghats im langzeitlichen Verlauf ähnliches Verhalten (bzgl. Mittelwerte) aufweisen. Überlegungen bezüglich lokaler Einflußfaktoren, die das Wettergeschehen stark beeinflussen können, sind dabei in Betracht gezogen worden. Hierzu zählen ausschlagsgebende Faktoren wie die natürliche Vegetation, Landnutzungsareale, Bewässerung, Bodentyp, aber auch lokale Reliefverhältnisse, trennende Bergrücken und/oder verschiedene Hangexpositionen. Sie können bereits auf kleinstem Raum Einfluß nehmen und lokale Klimaphänomene (Microklima) auslösen. In den nur 500 m auseinander liegenden Gebieten Khet und Bari zeichnen sich diese lokalen Klimaphänomene bereits schon an den ersten Beobachtungsreihen ab (vgl. Tab. 3.1).

Das folgende Referenzklimadiagramm in Abb. 3.4 repräsentiert somit die untersuchte Region und zeigt die typische Saisonalität zwischen der monsonalen Regen- und Trockenzeiten (alternierendes Regime).

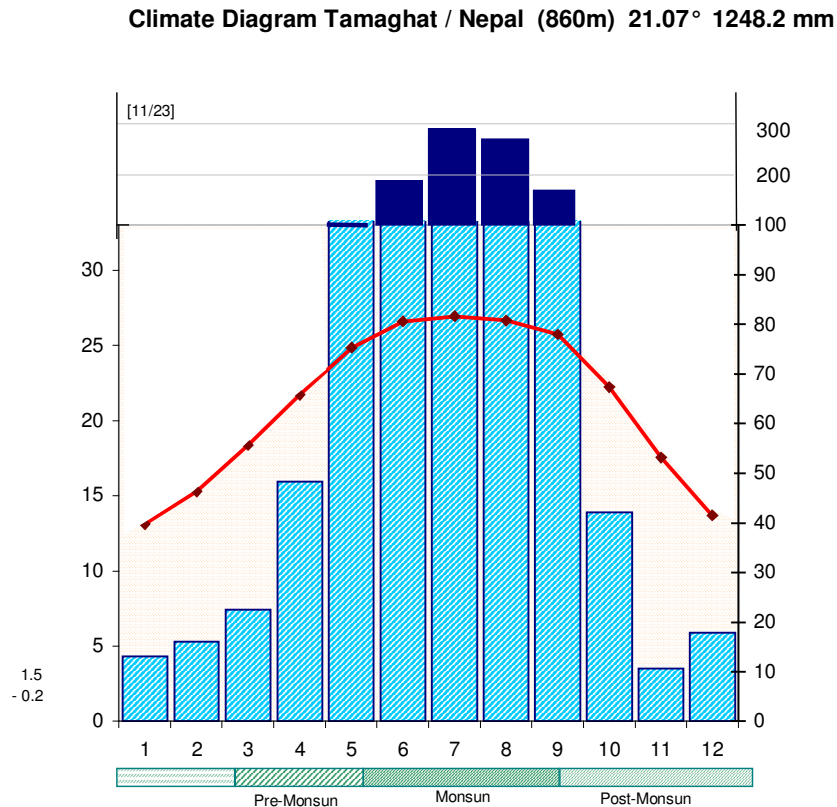


Abbildung 3.4 Klimadiagramm Tamaghat/Nepal (Entwurf nach WALTER/LIETH)
Figure 3.4 Typical climate diagram of the region (after WALTER/LIETH)

Für Tamaghat wird eine Jahresmitteltemperatur von 21°C gemessen. Das mittlere Monatsmaximum schwankt zwischen 27°C und 32°C, das absolute Maximum steigt über 36°C. Das mittlere Monatsminimum liegt bei 14°C, es wurden aber auch absolute Minima mit Minusgraden aufgezeichnet. Die täglichen Temperaturschwankungen bewegen sich in den Wintermonaten um 10°C, in den Monaten März-April um 21°C. Für den Niederschlag liegen die durchschnittlichen Jahresmittelwerte bei ca. 1250 mm. Das DHM bestätigt diese Auswertung (KANSAR et al. 2002).

In der Tab. 3.1 werden die Klimadaten der Klimastationen aus dem Untersuchungsgebiet mit denen aus Tamaghat verglichen. Ob die ermittelten Meßwerte während der Kampagne ein typisches Jahr repräsentieren, kann nur durch längere Zeitreihenanalysen abgeschätzt werden. Die monatlichen Niederschlagssummen sind einer gewissen jährlichen Variabilität unterworfen, jedoch erscheint die Dauer des Sommermonsuns in allen drei Stationen von Mai bis September übereinzustimmen. Die Temperaturamplitude (°C) ist annähernd gleich.

Tabelle 3.1 Gegenüberstellung verschiedener Klimastationen (Bsp. Niederschlag und Temperatur)
Table 3.1 Comparison between climate stations (precipitation and temperature)

Niederschlag	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Summe
Tamaghat (23 J)	13.16	16.03	22.52	48.22	101.73	195.40	291.31	287.71	171.40	42.06	10.59	17.81	1217.93
Khet (1J)	2.7	12.3	12.7	40.4	92.1	120.3	264.9	250.4	96.0	18.8	5.8	0.6	917.00
Bari (1J)	3.1	12.2	4.2	49.0	151.5	187.5	339.2	290.6	117.3	4.7	4.4	3.1	1166.82
Temperatur	Mittel												
Tamaghat (23 J)	13.13	15.28	18.38	21.72	24.86	26.59	26.95	26.65	25.73	22.24	17.57	13.71	21.07
Khet (1J)	11.73	13.91	17.72	21.86	23.46	25.69	25.50	25.07	23.64	21.18	16.45	12.72	19.91
Bari (1J)	12.21	14.41	18.23	23.45	24.11	25.84	25.61	25.38	24.15	21.00	16.93	12.58	20.33

Daß die saisonale Niederschlagsverteilung insbesondere in den *Middle Mountains* Nepals durchaus starken Schwankungen unterworfen ist, beweist die langjährige Beobachtungsreihe Tamaghats (Abb. 3.5). Dieses Phänomen wird auch im Untersuchungsgebiet erwartet.

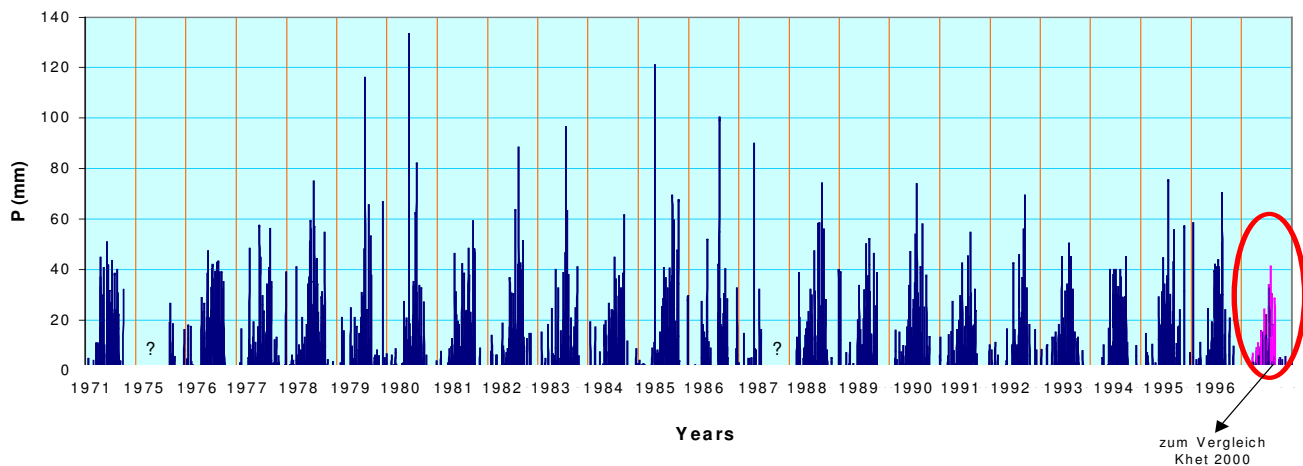


Abbildung 3.5 Langjährige Beobachtungsreihe der Niederschlagsverteilung, Referenz-Klimastation Tamaghat (Zeitreihe 23 J. ; zusätzlicher Vergleich Khet 2000)
Figure 3.5 Precipitation long time records of Thamagat (23 years)

Extreme Ereignisse und Ausmaße im Schwankungsbereich der jährlichen Niederschlagssummen, so wie es die Tab. 3.2 für die Station Tamaghat verdeutlicht, sind durchaus auch im Untersuchungsgebiet denkbar.

Tabelle 3.2 Niederschlagsstatistik für Tamaghat
Table 3.2 Precipitation in Tamaghat by statistical analysis

Niederschlag (mm)	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
tägl. N												
Mittel	0.42	0.57	0.73	1.61	3.28	6.59	9.4	9.28	5.71	1.36	0.35	0.57
Min	0	1	0	2.5	8.5	8.7	29.5	37.2	15	0	0	0
Max	58.5	21	41	90	120.8	133.4	116	99	69.5	67	56.5	66.8
mittl. Max	10	9.9	11.2	20.1	33.6	40.6	55.4	56.5	41.5	18.2	7	12.6
monatl. N total												
Mittel	13.16	16	22.5	48.2	101.7	195.4	291.3	287.7	171.4	42.1	10.6	17.8
Min	0	1	0	2.5	24.6	16	164.9	201.3	40.2	0	0	0
Max	63.8	36.5	103.4	152.4	177.7	489.4	428.6	414.2	373.2	217.8	87.8	82.5

(Beobachtungsreihe Klimastation Tamaghat 23 J.)

In Tamaghat wurde 1976 ein jährliches Niederschlagsmaximum mit 1742 mm erreicht, dem gegenüber sind während der beobachteten Zeitreihe von dreiundzwanzig Jahren im trockensten Jahr 1992 nur 882 mm registriert worden. Absolute monatliche Niederschlagssummen sind in den Monaten Juni und Juli 1978 mit 489 und 428 mm sowie im August 1978 mit 414 mm gemessen worden. Das stärkste Niederschlagsereignis ereignete sich am 09.06.1980 mit 133 mm (s. Abb. 3.5 und im Anhang A 3.1 mit N-Wiederkehrintervall). Diese langjährige Beobachtungsreihe der Niederschläge vermittelt wichtige Informationen zur Beurteilung der Meßwerte aus dem Untersuchungsgebiet. Es ist daher wahrscheinlich, daß die Untersuchungskampagne 2000 in ein trockeneres Jahr einzuordnen ist, was die gemessene jährliche Niederschlagssumme im Khet mit nur 917 mm vermuten läßt (s. in Abb. 3.5 zum Vergleich Khet 2000).

Mit den zur Verfügung stehenden Datensätzen aus dem Testgebiet wurden klimatische Wasserhaushaltsbilanzen abgeschätzt. Die Tab. 3.3 zeigt potentielle Verdunstungswerte (Class-A-Pan), aber auch aktuelle Verdunstungswerte, welche auf modifizierten Pflanzenwasserverbrauchswerten basieren (DOORENBOS & KASSAM 1979) bzw. über die Verdunstungstankformel ermittelt wurden (s. Kap. 4.1.3). Bei einer durchschnittlichen potentiellen Verdunstung von ca. 2137 mm im Jahr für das Khet-Gebiet und ca. 1934 mm für das Bari-Gebiet fällt die klimatische Wasserbilanz in beiden Untersuchungsgebieten negativ aus. Das monatliche Verdunstungsmaximum (akt. ETP) wird im September mit ca. 187 mm im Khet-Gebiet, im Bari-Gebiet mit ca. 249 mm erreicht. Das Minimum wird im Khet im Januar zu 26 mm ermittelt, im Dezember im Bari zu 59 mm. In Tab. 3.3 sind die Summen der Beobachtungszeiträume gegenübergestellt (Tab. mit Monatswerten über das Jahr findet sich im Anhang A 3.2.1 und A 3.2.2).

Tabelle 3.3 Gegenüberstellung der Wasserbilanzen mittels Input/Output
Table 3.3 Comparison of water balance in Khet und Bari (Input and Output)

	Khet	Bari
Jahresbetrachtung	Februar 2000 bis Jan 2001	April 2000 bis März 2001
Jahressumme N	907,10 mm	1163,12 mm
Jahreszufluß Bewässerungskanal	2675,18 mm	0
Jahresinput	3578,18 mm	1163,12 mm
Pot. Evapotranspiration	2136,90 mm	1934,12 mm
Akt. Evaporation	1352,31 mm	1590,68 mm
Gemessener Abfluß am Einzugsgebietsauslaß	1805,48 mm	752,17 mm
Gesamter Jahresoutput	3942,38,65 mm	2682,07 mm
Wasserhaushaltsbilanz	- 364,21 mm	- 1518,95 mm

Die monatliche Aufschlüsselung wird in Abb. 3.6 a. und b dargestellt. Im Khet sind die Monate Feb.–März und Nov.–Dez. 2000 in positiver Bilanz, in allen anderen Monaten wird im System gegenüber dem Input ein höherer Output verzeichnet. Im Bari-Gebiet zeigt der Monat August zumindest eine geringe positive Bilanz, wobei jedoch im Juli die Abflußwerte verworfen werden mußten bzw. geschätzt wurde. In beiden Einzugsgebieten wird im September ein negatives Maximum erreicht (Khet –232 mm, Bari –215 mm). Erfolgt die Wasserhaushaltsbilanzierung bei Einbeziehung aktueller ETP-Werte, werden die positiven Bilanzwerte für das Khet-Gebiet sogar in acht Monaten erreicht, dagegen können im Bari-Gebiet nur drei Monate beobachtet werden (vgl. Tab. A 3.2.1 und A 3.2.2 im Anhang).

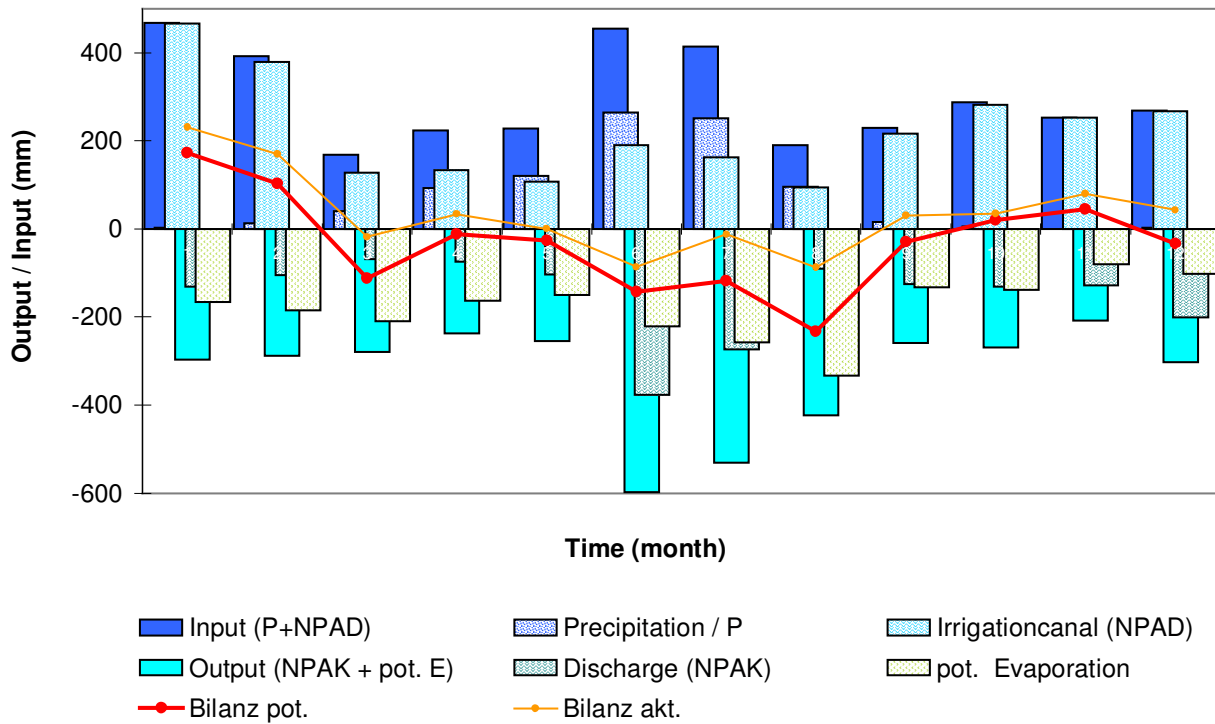


Abbildung 3.6 a
Figure 3.6 a

Wasserhaushaltsbilanz im Khet Gebiet (Feb. 2000 – Jan. 2001)
Water balance Khet catchment (Feb. 2000 – Jan. 2001)

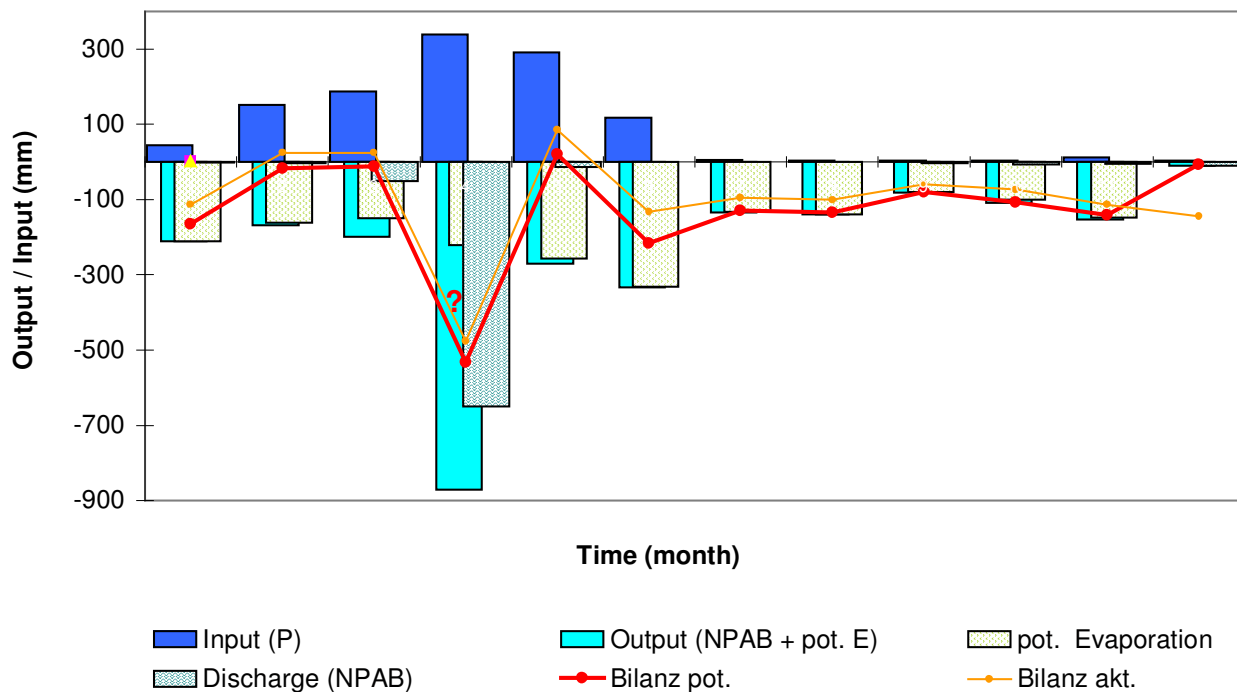


Abbildung 3.6 b
Figure 3.6 b

Wasserhaushaltsbilanz im Bari Gebiet (April 2000 – März 2001)
Water balance Bari catchment (April 2000 – March 2001)

3.3 Landnutzung

Das Projektgebiets liegt in einer Höhe von 870 m bis 1100 m ü.NN (Kap. 3.1). In dieser Region erwartet man in den *Middle Mountains* Nepals eine potentielle Vegetation mit gemischten Hartholzgewächsen und *Pinus roxburghi* (Chir pine) (Vegetationsgliederungen und Zonalitäten in: MANANDHAR & SHAKYA 1996 und PANDAY 1995), hätte hier nicht vor etwa 40 Jahren zunehmende Besiedelung und dadurch im großen Umfang Rodungen an steilen Hängen stattgefunden (HERRMANN 1999). Die Auswertung der Temperaturdaten zeigen Bereiche zwischen 13°C – 27°C (Tab. 3.1), somit reicht das Untersuchungsgebiet nur knapp an den Einflußbereich der warm temperierten Zone ($> 15^{\circ}\text{C} \leq 20^{\circ}\text{C}$) heran, wird aber hauptsächlich durch die subtropische Zone ($> 20^{\circ}\text{C}$) geprägt.

Heute ist im Einzugsgebiet landwirtschaftliche Nutzung überwiegend. Die Landnutzung orientiert sich in erster Linie an orographische Gegebenheiten (Höhe, Neigung, Exposition). Viele landwirtschaftlich genutzte Felder befinden sich auf relativ steilen Berghängen, sind dadurch potentieller Erosion ausgesetzt. Die Luftbildserien aus dem Jahr 1996 belegen, daß im betrachteten Gebiet bislang erst marginale Flächen betroffen sind. Die Studie von PRAISEI (2001) über die aktuelle Situation im Einzugsgebiet dokumentiert Erosion anhand von thematischen GIS-Karten. Im Untersuchungsgebiet wird Landwirtschaft überwiegend auf nivellierten Terrassen praktiziert. Das Anbauggebiet läßt sich in zwei unterschiedliche Nutzungsareale einteilen. Das bewässerte Land (Khet) und das auf Regenfeldbau basierende unbewässerte Land (Bari). Die Terrassen der jeweiligen Nutzungsareale zeigen geringe Unterschiede in ihrer Konstruktion. Die Terrassen im Bari-Land sind sanft geneigt und haben keine Abgrenzungsdämme, dagegen sind die bewässerten Terrassen im Khet-Land in typischen Beckenformen angelegt und folgen deutlich den Konturlinien des Geländes.

Die Bauern haben gelernt, ihr Anbausystem an die lokalen Klimaverhältnisse und unterschiedlichen Höhenlagen anzupassen. Traditionell werden je nach ethnischer Herkunft unterschiedliche Anbausysteme praktiziert (PUJARA 2000). Traditionell spielen sicher die anfallenden Regenmengen und die Möglichkeit der Bewässerung eine Schlüsselrolle bei der Anbauplanung. Daneben gelten Kriterien wie verfügbare Arbeitsplätze, Zugang zu Märkten, Lage und/oder Zersplitterung der Landparzellen, sowie begrenzte Anbauzeiten durch den monsunalen Wechsel zwischen Regen- und Trockenzeiten.

PUJARA (2000) führte im Tinpiple Tal eine ausgedehnte Evaluierung über den aktuellen Landnutzungsstatus und die dadurch bedingten sozio-ökonomische Verhältnisse der lokalen Bevölkerung durch. Aspekte räumlicher Strukturen, Anbaumethoden, Landnutzungsformen, Landschaftstypen, Bodenbeschaffenheit bzw. –fruchtbarkeit, etc. wurden hinterfragt und statistisch ausgewertet. Wichtige Ergebnisse sind in Form thematischer GIS-Karten festgehalten. Auf dieser Grundlage lassen sich für das Untersuchungsgebiet spezifische Anbaumuster und Anbaupläne heraus arbeiten.

Die Studie zeigt, daß die bevorzugte Fruchtfolge im Khet-Land durch Reis, dann Kartoffel und schließlich Mais repräsentiert wird (ca. 74%). Die wichtigste Leitkultur ist der Reis. Ferner werden neben Reis, Kartoffeln und Mais auch Tomaten, Weizen und Bitter-Gurkenarten angebaut. Im Bari-Land setzt sich der Mais als typische Leitkultur durch, gefolgt von ausgedehnten Bracheperioden (ca. 42%). Genutzt werden auch andere Fruchtfolgevarianten wie Kartoffeln, Tomaten, Weizen, Senf oder Chili.

PUJARA (2000) leitete aus der Befragung einen typischen Anbaukalender ab. Dieser gibt detaillierte Informationen über Aussaattermine, Verpflanzung, Entkrauten, Pestizidbehandlung und Erntetermine (Abb. 3.7).

Die präsentierten Anbaugesbiete zeigen, daß das Khet-Land durchaus die Kapazität besitzt, bis zu drei Fruchtfolgen im Jahr zu ermöglichen. Bari-Land, höher und steiler gelegen, läßt nur eine Kultur und diese nur alle zwei Jahre zu. Nach Beobachtungen liegen die Felder dort meist über das Jahr brach.

----- Legend: S = Seeding; T = Transplanting; W = Weeding; P = Pesticide Use; H = Harvesting

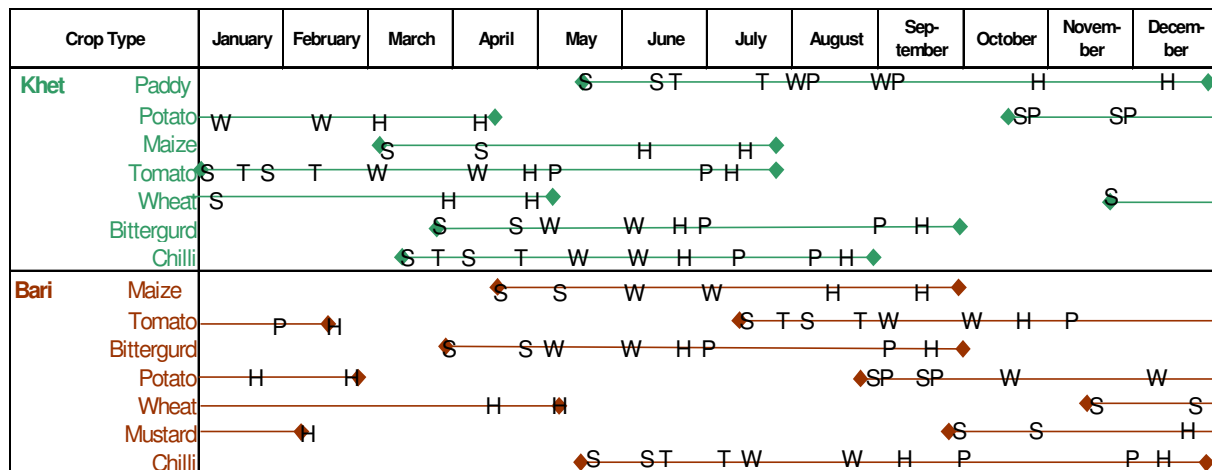


Abbildung 3.7 Der Anbaukalender (aus PUJARA 2000 verändert)
Figure 3.7 Crop calendar (source: PUJARA 2000 modified)

Aus dem Anbaukalender der beiden Untersuchungsgebiete geht hervor, daß hier drei Anbauzeiträume typisch sind. Die Saison während des Sommermonsuns (Juni bis Oktober), dann die Wintersaison (November bis Februar) und schließlich die Frühlingsaison (März bis Mai). Im Khet-Land werden die Felder sehr intensiv kultiviert. Weit verbreitet ist die Dreifelderwirtschaft. Die Bauern praktizieren lokal bis zu 10 verschiedene Anbauvarianten. Während des Monsuns dominiert aber schließlich doch die „Dreier-Kombination“ mit Reis, gefolgt von Kartoffeln und Mais oder Tomaten (*rice – potato – maize*).

Im Bari-Land wenden die Bauern mehr als 14 Anbauvarianten an. Während des Monsuns dominieren jedoch Mais und/oder Tomaten, der/die durch Weizen, Senf, Kartoffeln oder Chili abgelöst werden. Beliebt ist der Anbau mit nur einer Frucht (*maize – fallow – fallow*). Typisch ist, daß alle Felder von März bis ca. Mai brach liegen, in einigen Fällen sogar bis Oktober und über den ganzen Winter bis zum Frühlingsbeginn. Die geringe Produktivität im Bari-Land läßt sich durch die ungenügende Wasserversorgung ausschließlich durch Niederschläge und somit stärkerer Austrocknung der Böden erklären, die geringere Fruchtbarkeit hervorbringen und außerdem in höheren Lagen nicht mehr so tiefgründig sind. Gründe, die Felder zeitweilig brach liegen zu lassen. Laut PUJARA (2000) wird im Bari-Land generell für die Eigenversorgung angebaut. Eine tabellarische Zusammenstellung über prozentual bevorzugte Fruchtfolgen können bei PUJARA & KHANAL (2002) nachgeschlagen werden.

Der Anbaukalender in Abb. 3.7 ist für Zentral Nepal signifikant. Regional werden aber auch *Blackgram* und Gerste im Khet-, Fingerhirse im Bari-Land angebaut (MANANDHAR 1996).

Die Erkenntnisse dieser Landnutzungsuntersuchung dienen als Grundlage für die Kulturpflanzenzuordnung bzw. pflanzenphänologische Codierung in der Bodenwasserhaushalts-simulation.

Um einen flächenhaften Eindruck über typische Anbaumuster im gewählten Khet Untersuchungsgebiet zu bekommen, soll der folgende Kartenausschnitt in Abb. 3.8 das Anbaumuster anhand der Evaluierungsergebnisse von PUJARA (2000) widerspiegeln. Innerhalb des kleinen Einzugsgebietes sind die Parzellen durch Katastergrenzen markiert. Es wurden repräsentative Parzellen ausgewertet. Kreisdiagramme stellen den ermittelten Anteil (%) der verschiedenen genutzten Kulturen bzw. Fruchtfolgevarianten da. Laut PUJARAS (2000) statistischer Auswertung zählt mit 75.3% Nutzungsanteil Reis gefolgt von Kartoffeln und Mais zu der favorisiertesten Fruchtfolge im Khet-Gebiet. Damit werden diese drei Leitkulturen für die folgenden Modellszenarien als repräsentativ angesehen und bilden dementsprechend für pflanzenphänologische Parameterbestimmung die erforderliche Grundlage (s. Tab. 6.2 und Kap. 7).

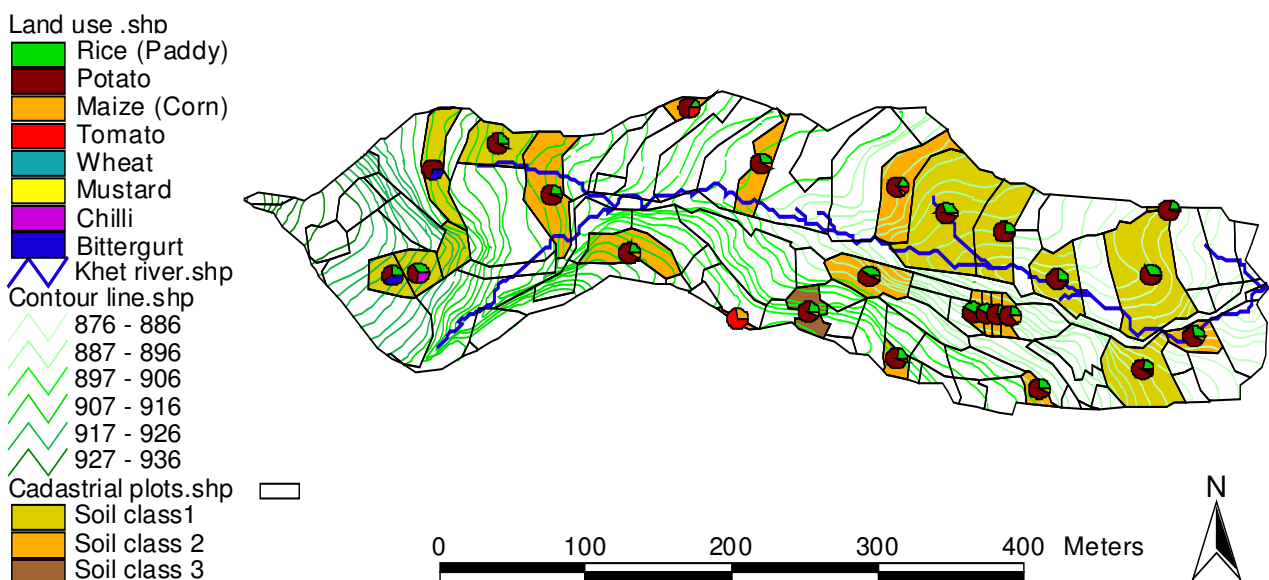


Abbildung 3.8

Evaluierung zur Landnutzung mit typischem Anbaumuster im Khet Land. Der Kartenausschnitt markiert Katastergrenzen. Ausgewählte Parzellen verdeutlichen anhand von Kreisdiagrammen bevorzugt angebaute Kulturen. Repräsentative Flurstücke geben Hinweis auf Bodenqualität.

Figure 3.8

Cadastral plots, soil quality and percentage of cropping pattern in the Khet-land

4 Datenbereitstellung

Das WaSiM-ETH Modell benötigt für die interne Simulation zwei verschiedene Datensätze. Der eine Datentyp beschreibt die gegebenen räumlichen Rahmenbedingungen und relevanten Gebietsinformationen, die flächenhaft konstant bleiben. Sie werden als Rasterinformation eingelesen bzw. in sogenannte *Grids* transformiert. Normalerweise werden zur räumlichen Darstellung des Ökosystems die geographischen Informationen durch thematische Karten vermittelt, die einen zeitunabhängigen Ausschnitt repräsentieren. Das digitale Höhenmodell (*DHM*) gehört dazu, auch die vorherrschenden Landnutzungstypen und die Bodenart, aber ebenso untergeordnete Detailinformationen wie beispielsweise Hangneigung, Exposition, Fließnetz u.a.. Andererseits braucht das Modell Datensätze mit genauen zeitlichen Informationen über entsprechende Beobachtungsperioden. Zu diesen Eingabedaten zählen meteorologische und hydrologische Größen oder Maßeinheiten (z.B.: Niederschlag, Temperatur, Abflußspende . . .). Häufig können diese Informationen jedoch nur an punktuell ausgewählten Standorten aufgenommen werden.

Ferner wird zwischen der Aufnahme von Primärdaten und der Ermittlung von Sekundärdaten (BILL 1999) unterschieden. Die Primärdaten oder auch Originaldaten stammen direkt von dem beobachteten Objekt (Feldaufnahme) oder werden als Bild projiziert (Luftbild / *Images*). Zu Sekundärdaten werden sie, wenn sie unterschiedlichen '*pre-processing*' Methoden ausgesetzt sind, wobei die Originaldaten indirekt an die Modellbedürfnisse angepaßt werden. Die Tab. 4.1 zeigt eine Auflistung notwendiger Daten im Zusammenhang mit genutzten Preprozessingverfahren.

Tabelle 4.1
Table 4.1

Modelldatenbedarf
Data requirements for modelling

Spatial Data	Temporal data		Pre-processing
Geographical data	Climatological data	Hydrological data	
<p><u>⇒ Primary data</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Digital topography (<i>DEM</i>) Soil data (kf-value, storage capacity, soil type) Land use (crop type, fallow, meadow forest,...) <p><u>⇒ Secondary data</u></p> <p><u>Spatial transformation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Raster data (grid) All formats with same dimension and size <p><u>Calculation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Exposition Slope Flow direction Flow accumulation Flow net (river) Catchment boundary Topographic factor <p><u>Parameter estimation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Pedotransfer function 	<p><u>⇒ Primary data</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Station values with different time resolution modelling (temperature, radiation, wind speed, humidity, are pressure, sun shine duration) <p><u>⇒ Secondary data</u></p> <p><u>Temporal transformation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Uniform format (equal time steps) <p><u>Calculation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> IDW, regression or Thiessen (geometric topologic), temporal interpolation (statistical method) 	<p><u>⇒ Primary data</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Discharge data from available gauges <p><u>⇒ Secondary data</u></p> <p><u>Temporal transformation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Discharge per unit area (l/s(km²)) Discharge per unit area into inverse discharge per unit area <p><u>Calculation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Statistics (average + mean value) <p><u>Parameterisation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> recession constants 	<p>Source of data supply from several places</p> <p><u>Converted data</u></p> <p><u>Parameter estimation</u></p> <p>Auxiliary help tools (PC-programs an GIS-application)</p>

4.1 Erfassung und Aufbereitung der temporalen Datensets

Gemäß der Modellbedürfnisse werden meteorologische und hydrologische Inputvariablen benötigt. Diese Datentypen stellen die treibende Kraft im Ökosystem dar und besitzen daher für die Prozeßmodellierung wesentliche Bedeutung (s. Tab. 4.1 *temporal data*).

Meteorologische Daten mit täglicher Auflösung (Temperatur und Niederschlag) werden im Einzugsbereich des Jhikhu Kohla Flußnetzes bereits seit den Siebzigern vom DHM aufgezeichnet. Die aufzeichnenden Klimastationen befinden sich aber nicht innerhalb des Projektgebietes. Die Klimadaten, die am ehesten vergleichbar wären, stützen sich auf die Stationswerte Tamaghat (vgl. Kap. 3.2). Der Raum um Tamaghat zeigt generell ähnliche gebietsspezifische Merkmale und liegt nicht weit vom Projektgebiet entfernt.

Um detailliertere Angaben über das lokale Klimageschehen zu bekommen, wurden eigens für das Projekt zwei neue Klimastationen errichtet, die ihren Betrieb ab dem 14.06.99 aufnahmen (IPMS-Interim Report 2000). Seitdem werden die Daten über automatische Registrierungen vorwiegend stündlich, bisweilen auch im (Deka-) Minutentakt erfaßt. Hierzu zählen die Zeitserien: Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Temperatur, rel. Luftfeuchte, Global Strahlung. Ferner werden ab dem 12.12.99 Bodentemperaturen und Luftdruck ermittelt (Schlüsselcode für Khet-Station = NPAC, Bari-Station = NPAB und Tamaghat-Station = NPNA bzg. Datenbank u. Kartenlokalisierung in Abb. 4.2). Zusätzlich wurde ein Verdunstungskessel (Class-A-Pan) aufgestellt, welcher mittels eines Druckaufnehmers stündliche Meßwerte liefert. Darüber hinaus werden an drei Meßwehren die Wasserstände ermittelt (Schlüsselcode für Khet-Wehr = NPAK, Bari-Wehr = NPNB und Khet-Wehr-Zulauf = NPAD). Die neuen Klimastationen erfassen einerseits das bewässerte Khet-Land in einer Höhe von 906 m ü.NN, andererseits das unbewässerte Untersuchungsgebiet im Bari-Land in einer Höhe von 918 m ü.NN. Diese beiden Meßstationen liegen nur etwa 500 m auseinander (s. Abb. 4.2).

Im folgenden Diagramm (Abb. 4.1) wird der Status der temporalen Datenserien gezeigt, der als Modellausgangsdatenlage dient.

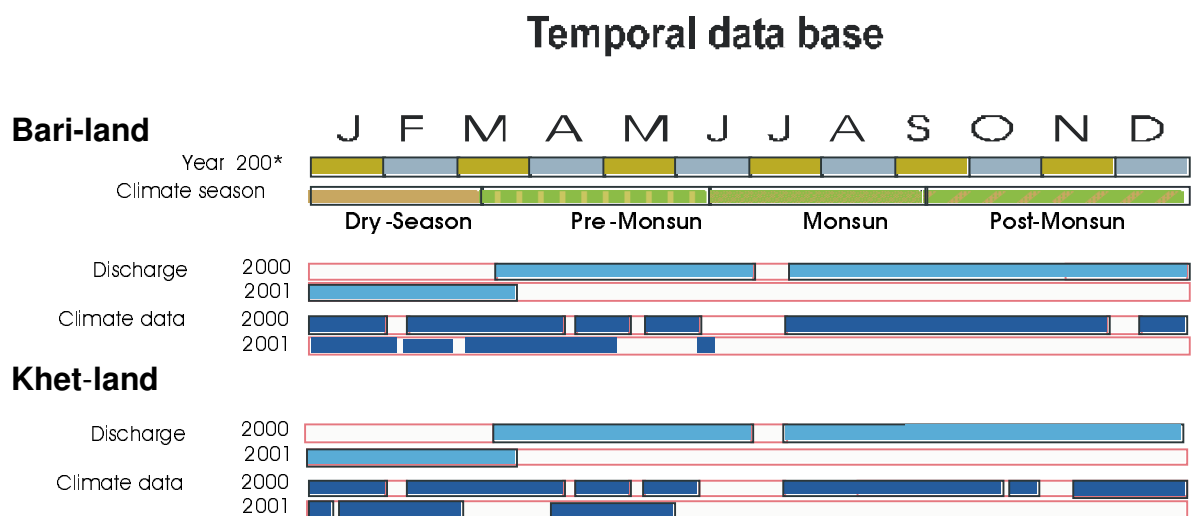


Abbildung 4.1. Zeitliche Datengrundlage
Figure 4.1. Temporal data base: Bar graph of period of record

Die blauen Balken markieren die erfaßten meteorologischen und hydrologischen Daten über den Zeitraum der Jahre 2000 bis 2001. Leer belassene Balkenabschnitte dokumentieren meßtechnisch bedingte oder durch Unwetter hervorgerufene Ausfälle. Leider bewirkten die instabilen politischen Verhältnisse in Nepal am 7.7.2001 ein vorzeitiges Ende der Meßkampagne.

4.1.1 Hydrologische Betrachtung und Ermittlung der Abflußdaten

Wie Eingangs angedeutet (Abb. 3.2), unterscheiden sich die beiden Abflußsysteme im Tinpile Tal von einander. Die Abb. 4.2 zeigt eine Karte des Tinpile Tals mit dem gekennzeichneten Einzugsgebiet Khet (Zielobjekt der Untersuchung) und dem Nebengebiet Bari mit Meßstationen.

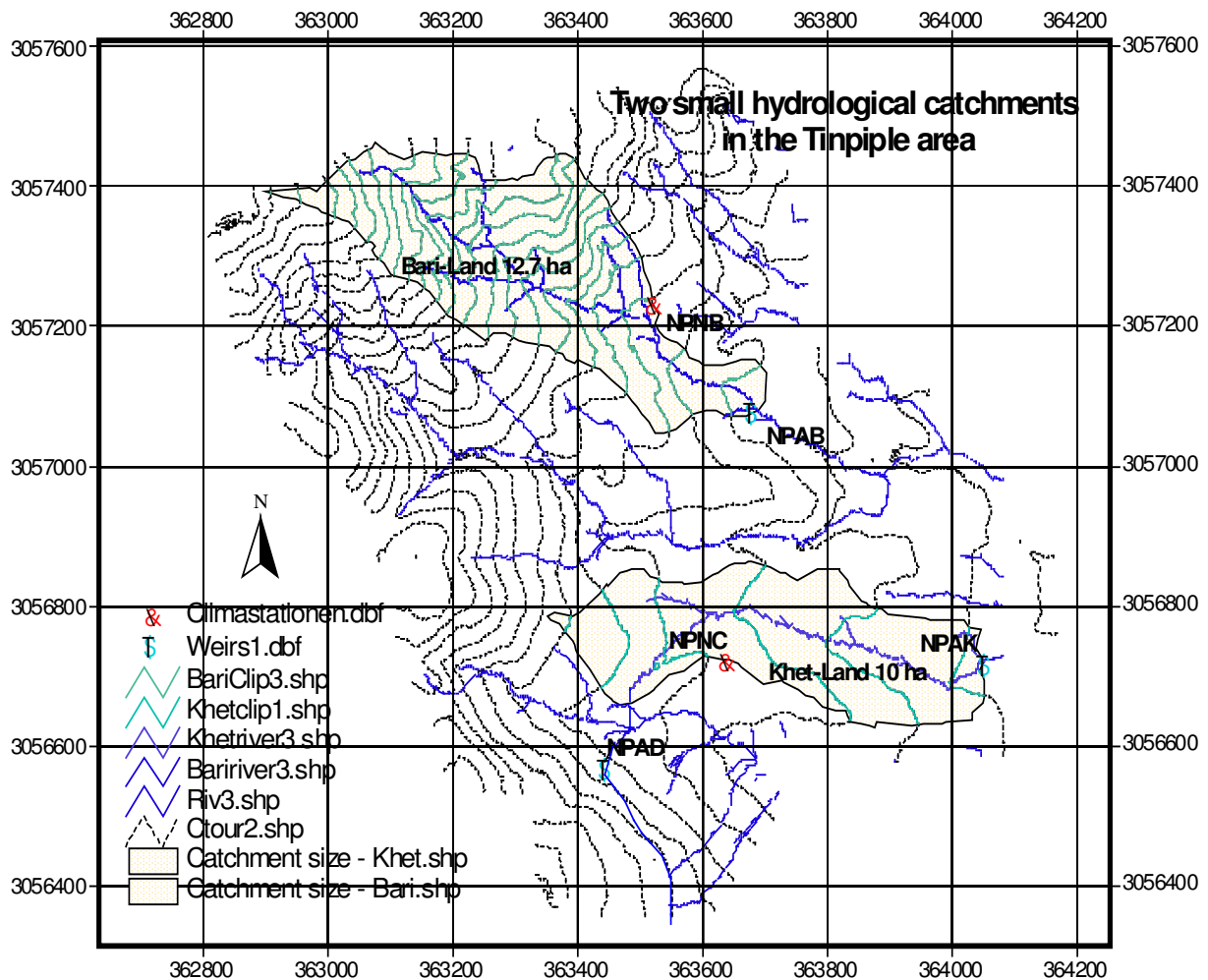


Abbildung 4.2 Tinpile Tal mit gekennzeichnetem Einzugsgebiet Khet und dem Referenzgebiet Bari mit Meßstationen

Figure 4.2 Two small hydrological catchments in Tinpile valley, the main research area Khet and the reference area Bari

Das nördliche Vergleichsgebiet Bari besitzt einen Einzugsbereich von ca. 12 ha und zeigt ein hydrologisch geschlossenes System, wobei im Abflußverhalten des Gerinnes intermittierende Tendenzen zu beobachten sind. Das Gebiet weist steile Hänge auf, die lokal höhere Niederschläge auslösen können (Luftströmungstau s. Tab. 3.1). Die Felder im Regenfeldbauggebiet werden kaum anthropogen beansprucht (hauptsächlich Brache, wenige Terrassen, s. Kap. 3.3).

Das flacher ausgebildete Hauptuntersuchungsgebiet Khet mit einer Einzugsgebietsgröße von ca. 10 ha ist überwiegend durch Terrassenumformung und Kanäle gekennzeichnet. Es wird vollständig kultiviert und ist daher intensiven Bewässerungsphasen ausgesetzt. Die Abb. 4.3 zeigt das Kanalnetz des Khet-Einzugsgebietes. Zudem wird das Kanalnetz ganzjährig aus dem Danfe Khola gespeist, der in das weitaus größere benachbarte Einzugsgebiet Okhar Khola mit seinen Nebenflüssen Kubhinde- und Dhita Khola einzuordnen ist (geschätzte Einzugsgebietsgröße etwa 20 km²). Dieses macht deutlich, daß das benachbarte Flußnetzsystem weitaus mehr Niederschläge auffangen kann „rain harvesting“, als es dem kleinen Gerinne im Khet je gelingen würde. Der Zulauf wird durch eine feste Regulierungseinrichtung mittels eines kleinen Holzschützes (*flash board*) kontrolliert und kann somit den annuellen Verlauf (Gebietsverhalten) des benachbarten Regimes nicht wiedergeben. Der Zufluß erscheint daher relativ geglättet.

—► Flowdirection
 Generated river course (Tanalys)

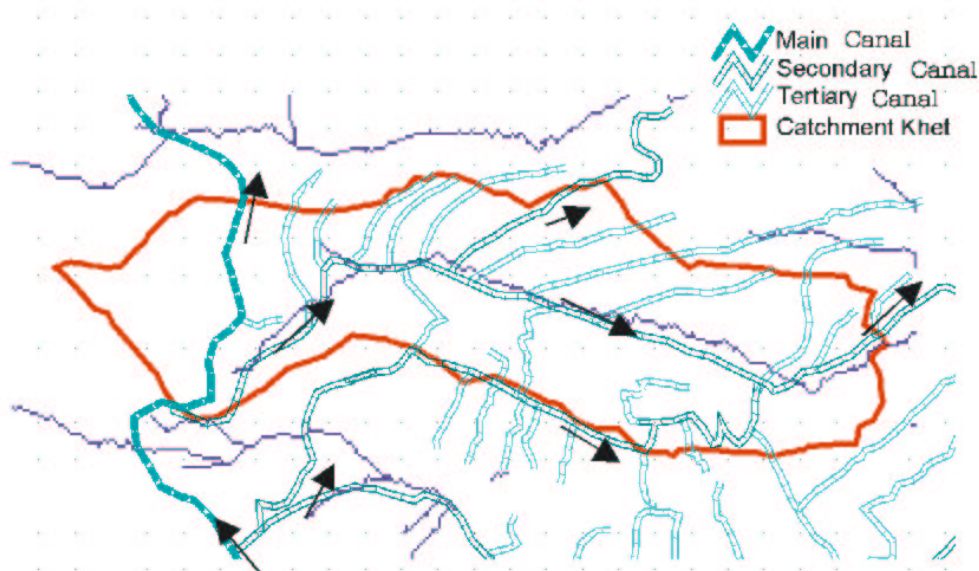


Abbildung 4.3 Kanalnetz des Khet-Einzugsgebietes (Quelle: PRASAI 2001 verändert)
 Figure 4.3 Irrigation canal net in the Khet catchment (Source: PRASAI 2001 modified)

Um einen Eindruck der Abflußmengen der Gerinne am Gebietsein- und -auslaß zu bekommen, werden vom DHM Abflußmessungen durchgeführt. Dem DHM obliegt ferner, regelmäßige Wartungen durchzuführen. Der Abfluß wird mit einem Meßflügel bestimmt und weiter im Verhältnis zu den Wehrdimensionen kalibriert. Die Wehre NPAK und NPAB besitzen eine Konstruktion aus Zement und können als scharfkantige Dreieckswehre bezeichnet werden (*V-notch weir*). Ihr Öffnungswinkel beträgt 90°. Die Wehrausführung entspricht nicht den bekannten Standards. Nachdem anfänglich noch keine eindeutigen hydraulischen Wehrabmessungen vorlagen, wurden die Abflüsse zunächst über iterative Ansätze ermittelt (gemäß Manning-Strickler). Hierbei wurden relevante Parameter, wie Gefälle aus der topographischen Karte abgelesen und Rauigkeitsbeiwerte geschätzt. Die auf diese Weise ermittelten Abflußmengen wurden jedoch zu hoch kalkuliert, da nicht berücksichtigt wurde, daß bei Eintreten höherer Wasserstände die Wehrkante überschritten bzw. überflutet wurde. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Trapezwehrprofil zum dreieckigen Überfall bei der Abflußberechnung hinzu addiert. Die gegenwärtigen Abflüsse

wurden daher für jedes einzelne Wehr mittels neu abgestimmter Abflußschlüsselkurven korrigiert $Q_{\text{total}} = Q_{\text{v-notch}} + Q_{\text{Trapezoid}}$. Ein Beispiel kann anhand des Khet-Wehres in Abb. 4.4 gezeigt werden.

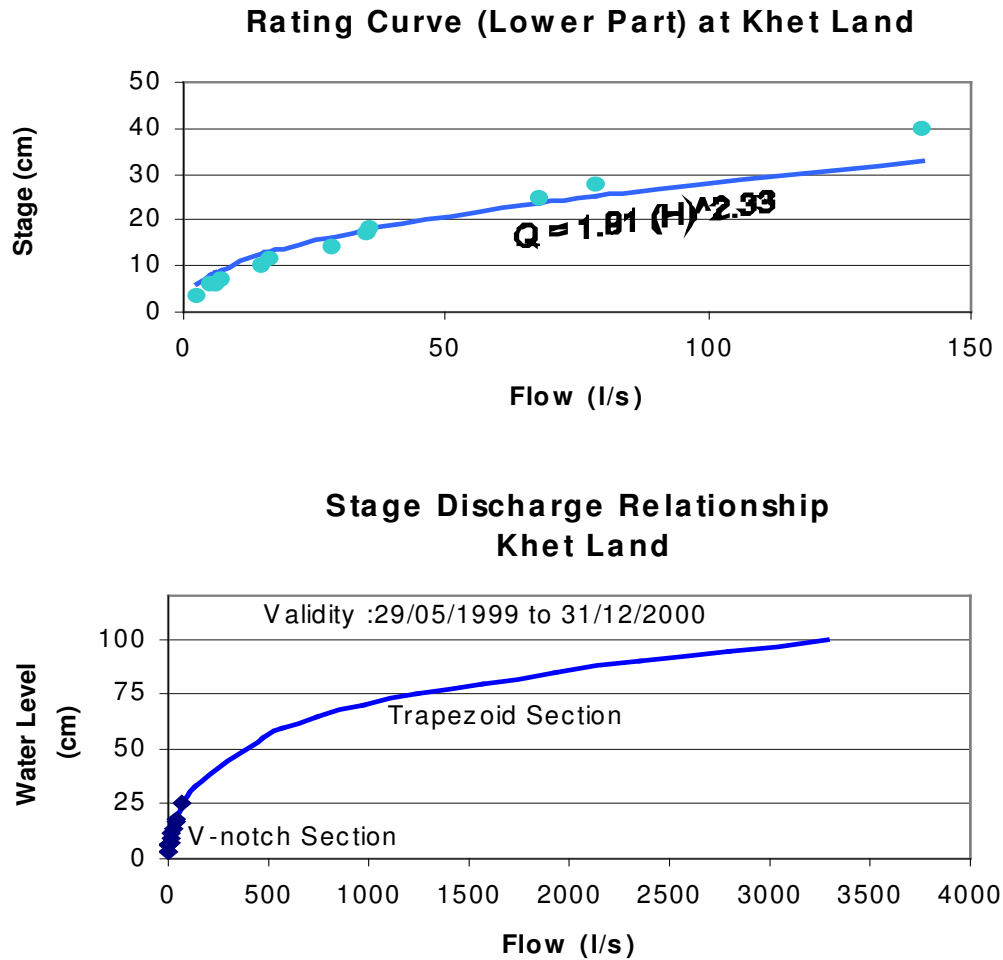


Abbildung 4.4
Figure 4.4

Abflußschlüsselkurve am Bsp. des Khet-Gerinnies
Rating curve at Khet-Land

4.1.2 Prüfung der meteorologischen und hydrologischen Datensätze

Um abschätzen zu können, ob die gemessenen Modelleingangswerte als zuverlässig anzusehen sind, werden sie zunächst auf Homogenität geprüft. Dabei werden Inkonsistenzen oder Meßfehler im Datensatz ausfindig gemacht. Inhomogenitäten treten auf, wenn das System zum Beispiel durch natürliche Einflüsse wie Klimaschwankungen, Naturkatastrophen oder anthropogenen Einflüssen, Änderungen unterworfen ist (KMK-DVWK 1979).

Vor dem Einlesen der Inputdaten in das Modell werden alle meteorologischen und hydrologischen Datenreihen gesichtet, wobei mögliche Ausreißer (z.B. Meßfehler), die weit außerhalb des Erwartungsbereiches liegen, gegebenenfalls eliminiert werden. Ferner werden meteorologische Datenlücken durch benachbarte Stationsdaten aufgefüllt. Dieses geschieht nur dann, wenn es auf Basis der Doppelsummenanalysen und Regressionsermittlungen vertretbar erscheint. Die Doppelsummenanalyse dient zur Ermittlung oder Korrektur von Unstetigkeiten in den Meßwerten einer Meßserie durch Vergleich ihres zeitlichen Trends mit benachbarten Stationen. Auf diese Weise können Verzerrungen des Systems ausfindig gemacht (numerische Änderungen wie Sprünge, Perioden, Trends etc.) und eventuell unterbunden werden bzw. zur weiteren Verwendung vergleichbare Zeitabschnitte heraus gesucht werden. Zur Veranschaulichung dieser Sachlage sind in der Abb. 4.5 die Problembereiche mit kleineren Sprüngen gekennzeichnet und für die Übertragung ausgeschlossen worden.

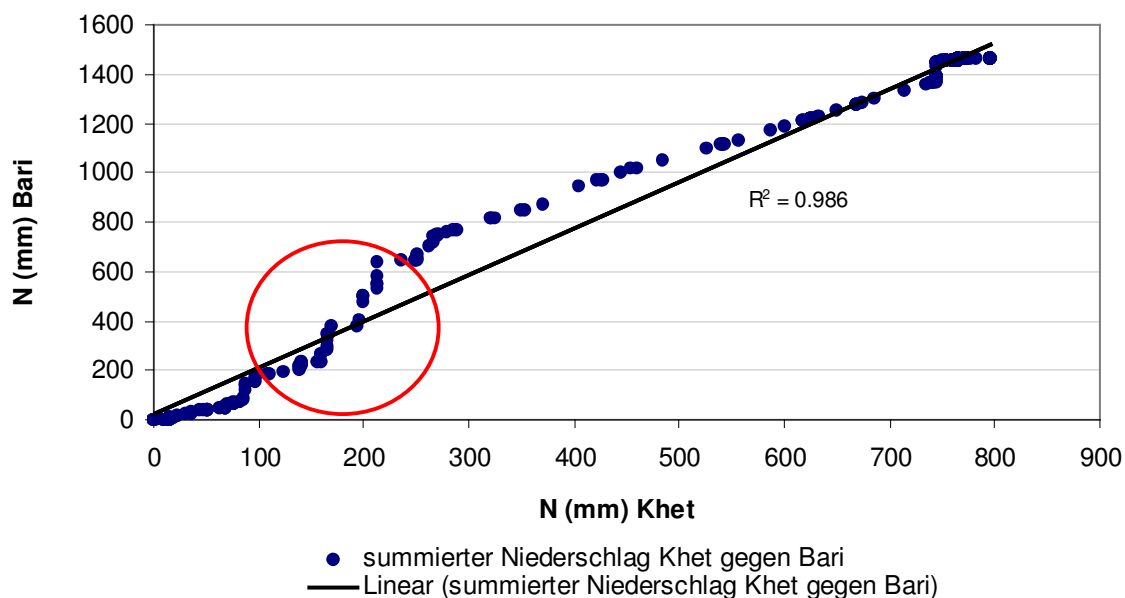


Abbildung 4.5 Überprüfung der Homogenität. Basisstationen für Niederschlag in Khet und Bari

Figure 4.5 Test of homogeneity, base station for precipitation in Khet and Bari

Zusätzlich erscheint es bei der Datensichtung hilfreich, die Niederschlagsmeßwerte der Beobachtungsreihen einer Häufigkeitsanalyse zu unterwerfen. Auf diese Weise lassen sich bereits im Vorfeld deutlich lokale klimatische Differenzen erkennen, wie sie auf Grund ihrer

Exposition und Topographie zu erwarten sind (vgl. Kap. 4.1.1). Zwar basieren die Ergebnisse der Stationen Khet und die des Nebenuntersuchungsgebietes Bari im Vergleich zu Tamaghat nur auf relativ kurzen Reihen, doch die Ausschnittsanalysen vermitteln zumindest einen quantitativen Eindruck über mögliche Häufigkeitsverteilungen auftretender Niederschlagsereignisse wie sie in der Abb. 4.6 festgehalten werden konnte.

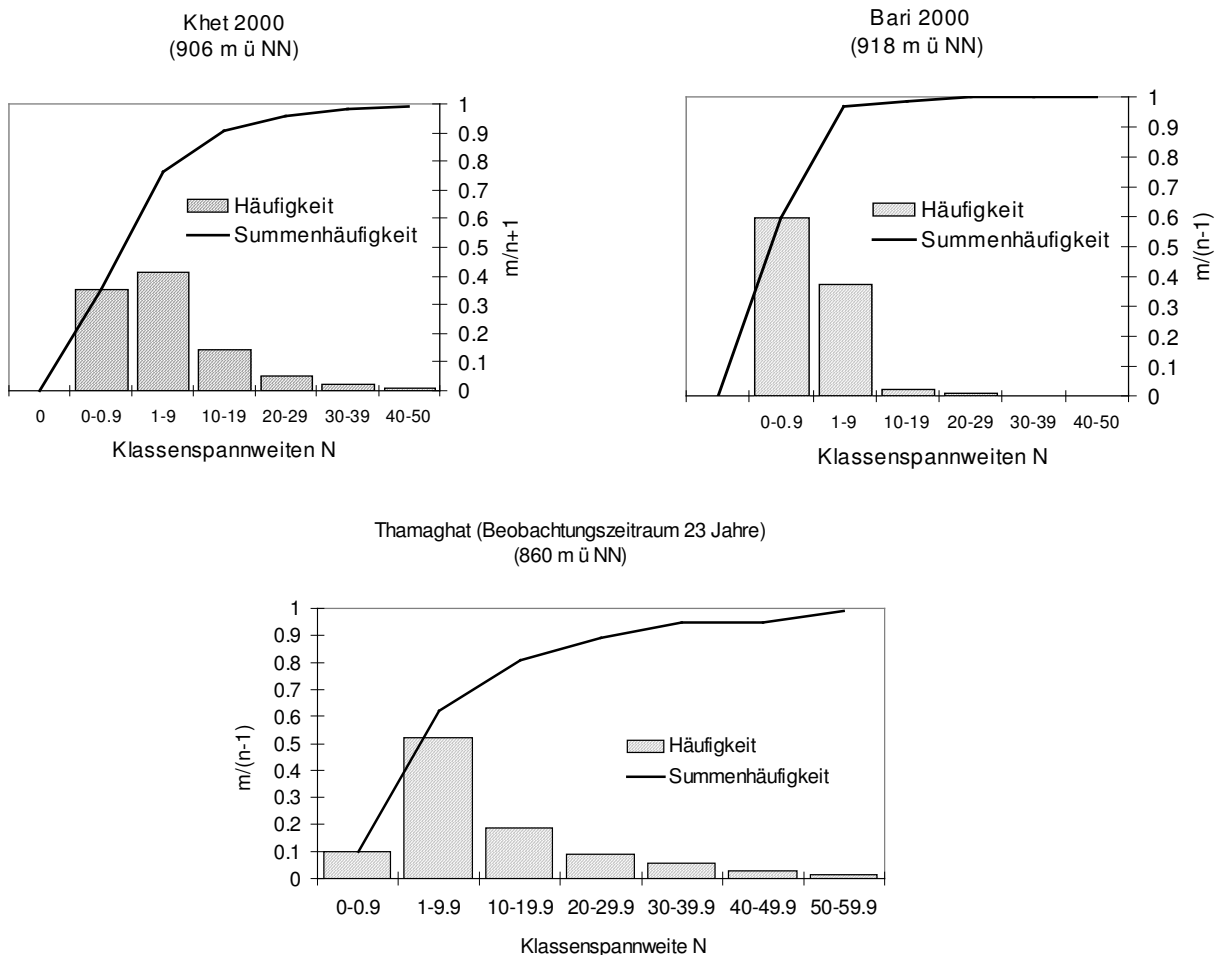


Abbildung 4.6 Niederschlagsanalyse in Tinipile und Tamaghat. Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit von Niederschlagsereignissen
Figure 4.6 Precipitation analysis in Tinipile and Tamaghat. Frequency distribution and mass curve

Eine genaue Vorstellung über den Grad der Sicherheit (Wahrscheinlichkeit) bezüglich des Eintretens der Niederschlagsereignisse kann jedoch nur am Beispiel der langjährigen Beobachtungsreihe der Station Tamaghat vermittelt werden (vgl. Abb. 3.5, ein Beispiel für die Auftrittswahrscheinlichkeit der Niederschläge in Tamaghat findet sich im Anhang A 3.1).

Besondere Aufmerksamkeit wurde den Abflußreihen gewidmet. Allgemein werden Abflüsse zu Vergleichszwecken im Zusammenhang mit der Modellvalidierung herangezogen, um die Genauigkeit der Modellergebnisse zu prüfen bzw. die Simulation zu kalibrieren.

Für die Einzugsgebiete Khet und Bari liegen Wasserstandsmessungen im zehnminütlichen Auflösungsintervall vor. Zudem wurden auch im Khet längere Zeitreihen ermittelt, die nur dreimal täglich über Handmessungen aufgezeichnet wurden. Diese besondere Meßgrundlage liegt leider nur in dieser Form für den externen Zulauf (Bewässerungskanal) am Oberlauf des Khet-Gerinnes vor. Ein Blick auf die Abb. 4.7 soll verdeutlichen, welche Schwierigkeiten auftreten können, wenn ein und dieselbe Abflußkurve mittels unterschiedlicher Verfahren gemessen und schließlich auf unterschiedliche Bezugszeiträume stündlich gemittelt bzw. skaliert wird.

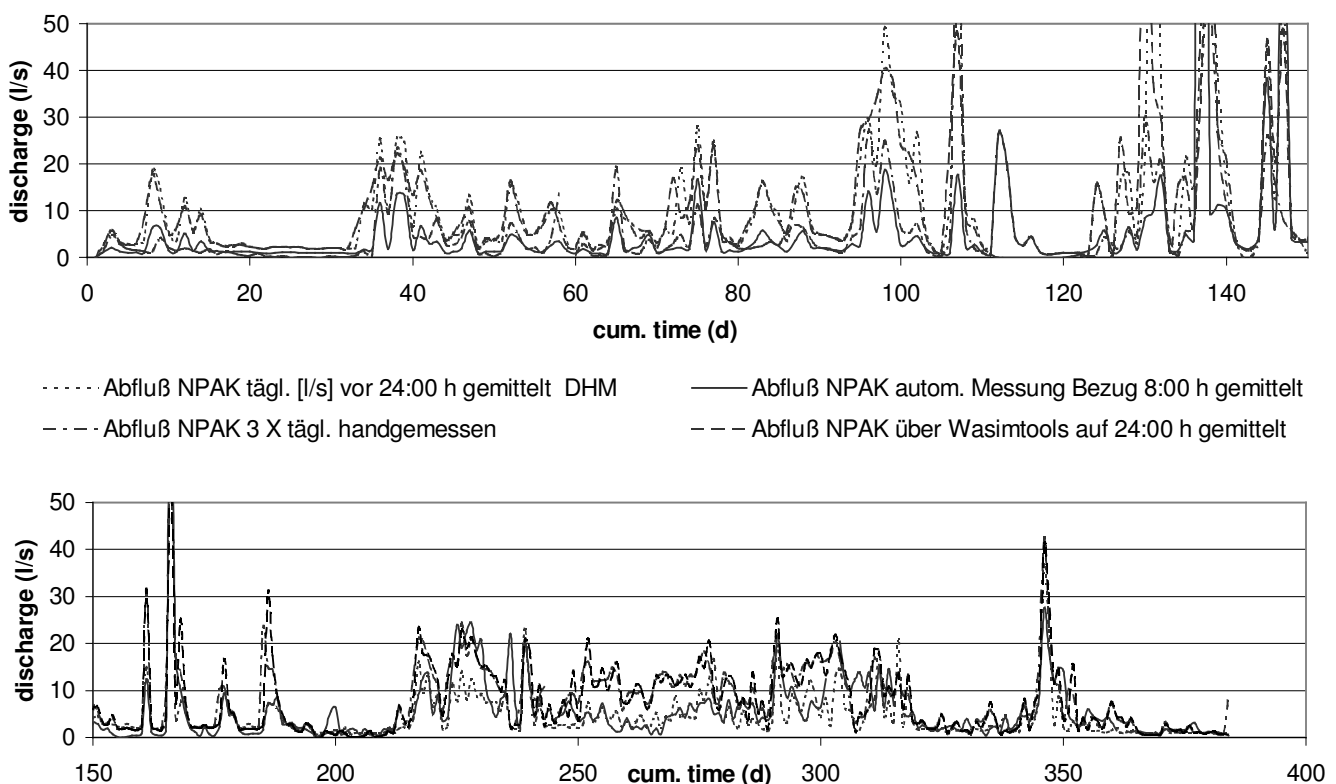


Abbildung 4.7
Figure 4.7

Quelldatenvarianz am Beispiel des Abflusses im Khet-Gebiet
Variation of discharge in the Khet catchment

Noch deutlicher ist die Verzerrung der Abflußkurve, wenn die unterschiedlichen Basiszeitskalen (je von 0:00h bis 23:00h) in einem kurzen Ausschnitt gegenüber gestellt werden (Abb. 4.8).

Diese Ausgangssituation läßt zunächst die Frage aufkommen, welche stündlich gemittelten Bezugsdaten das Abflußverhalten als „Signatur“ repräsentativ wieder geben, und ob die Zeitreihen für den Zulauf mit ihrer besonderen Meßgrundlage überhaupt mit den Zeitreihen des Abflusses zu kombinieren sind bzw. in das Modell eingelesen werden können. Hier muß wohl, wie in Kap. 2.3 gezeigt, eine angemessene Brücke (*up-scaling*) zwischen den Skalen geschlagen werden.

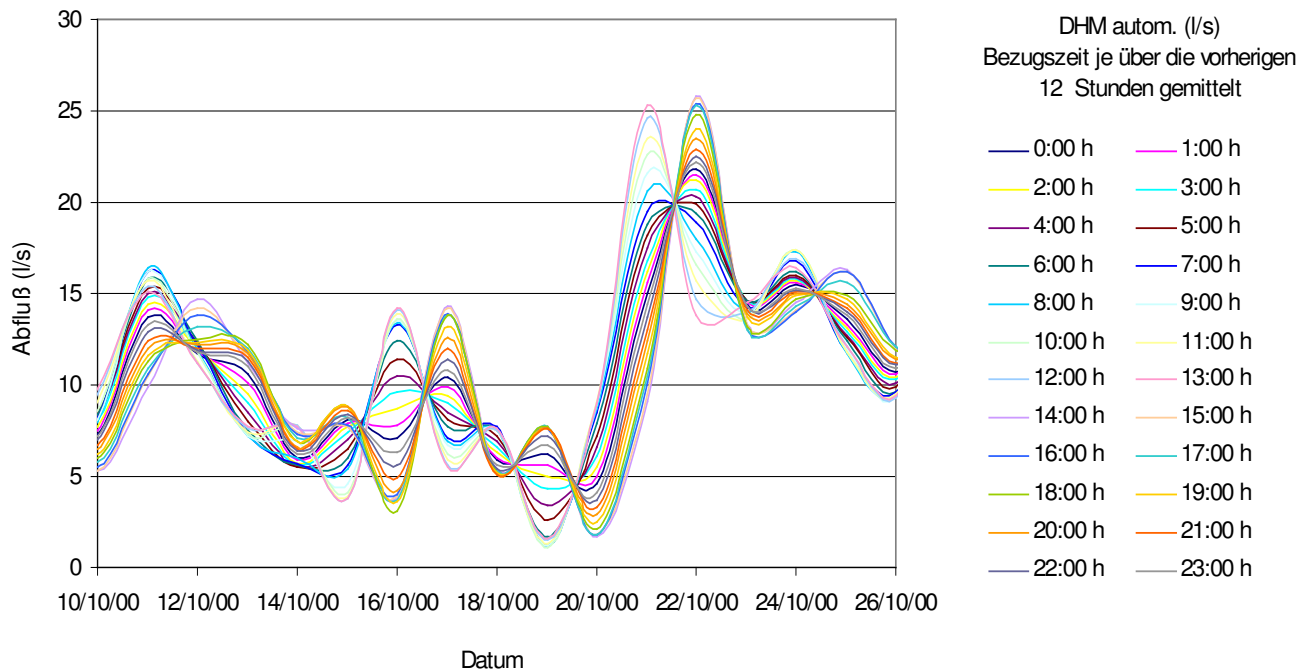


Abbildung 4.8 Variabilität des stündlich gemittelten Abflusses (Khet) im Zeitraum 10.10. – 26.10.2000

Figure 4.8 Variability of hourly mean discharge (Khet), time period 10.10. – 26.10.2000

Zunächst wird generell die Bezugszeit in der Hydrologie auf 0:00 Uhr festgelegt (KMK-DVWK 1979), welches im Folgenden auch für die Wasserhaushaltssimulation im Khet-Gebiet gelten wird.

Ferner sollen hydrologisch-statistische Prüfverfahren Aufschluß über den besonderen Sachverhalt der Inputmeßgrundlage für den Zulauf geben. Auf diese Weise kann im Nachhinein das Ausmaß der Modellunsicherheit objektiv beurteilt und abgeschätzt werden.

Da der Beobachtungszeitraum während der Projeklaufzeit nur relativ kurz war, bietet es sich an, partielle Serien aus den Datensätzen zu extrahieren. Für den Schwellenwert, der den Umfang des Datenkollektives festlegt, wurde das jährliche Mittel gewählt (s. Abb. 4.9). Die auf diese Weise gewonnenen Zeitreihenstichproben konnten nun statistischen Stichprobentests (z.B. K-S-Test und Phasenhäufigkeit nach WALLIS & MOOR) unterworfen werden (OLBRISCH 1974). Über die Prüftests konnte auch durch Transformation der Verteilungsfunktionen kein engeres Signifikanzniveau (Vertrauensbereiche von 5% über 30% und mehr) erreicht werden. Dies zeigt, daß die automatischen und handgemessenen Abflußreihen unterschiedliche Verteilungsmuster aufweisen und ihre Funktionen nicht zur Deckung gebracht werden können.

Diese Tatsache kann in der Tab. 4.2 über die statistischen Kennwerte der Meßstellen Khet und Bari demonstriert werden. Die Gegenüberstellung der automatischen Messungen und der Handmessungen im Khet machen deutlich, daß durch die Handmessung hohe Abflußspitzen geglättet oder gar nicht erfaßt werden. Laut Beobachtungen des DHM wird dieses bestätigt, da sich besonders hohe Abflußereignisse auch während der Nacht unerfaßt ereignen (KANSAKAR et al. 2001). Da im Einzugsgebiet jeder Niederschlagsinput mit einem sehr

schnellen Abflußoutput reagiert, können Handmessungen Maxima und Minima nur selten erfassen.

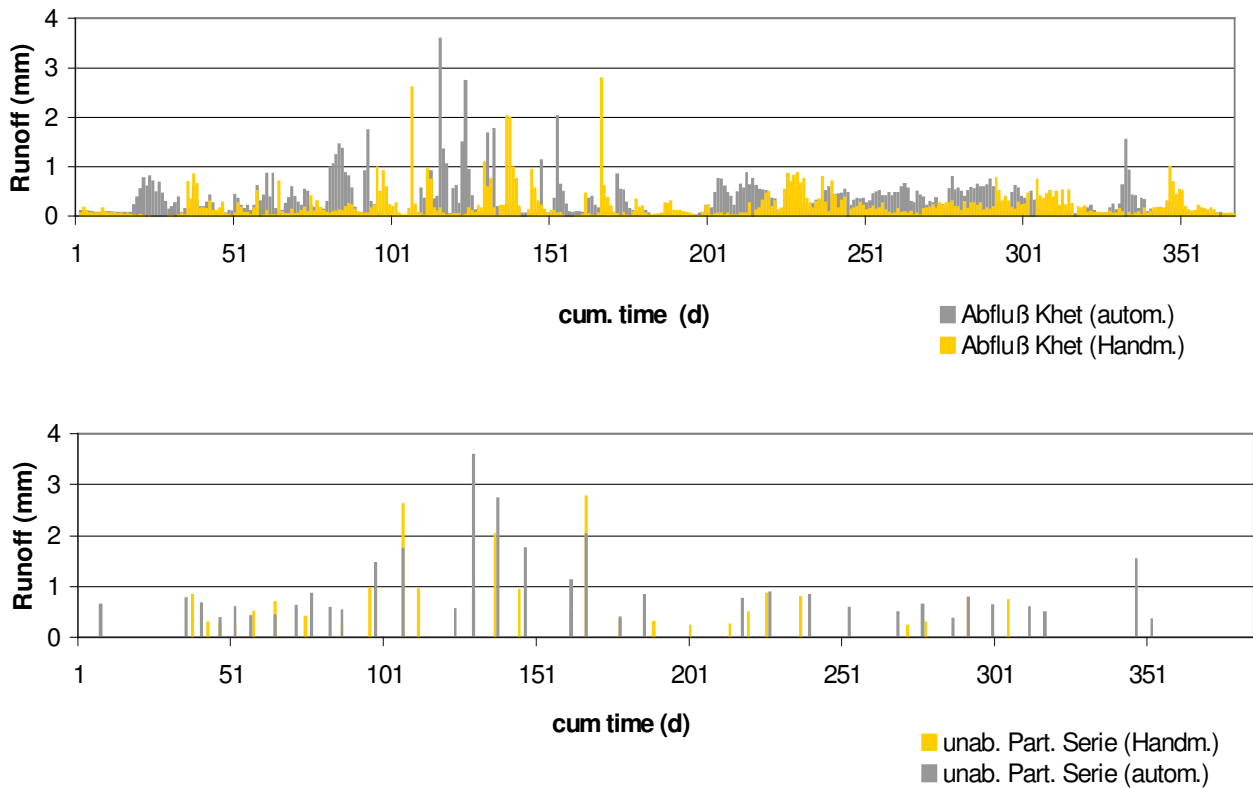


Abbildung 4.9 Vergleich zwischen automatisch registriertem und handgemessenem Abfluß in Khet mittels extrahierter partieller Serie
Figure 4.9 Comparison of runoff between automatic and manual measurements in Khet

Tabelle 4.2 Statistische Kennwerte der Meßstellen Khet und Bari
Table 4.2 Statistical analysis of discharge measurements in Khet and Bari catchment

Discharge	Khet (autom.)	x norm.	x stand.	Khet (Handm.)	x norm.	x stand.	Bari (autom.)	x norm.	x stand.
Minimum	0.36	-0.00015203	-0.79363	0.225773	0	-0.8158	0.020707	0	-1.1254
Maximum	3.587	0.99987	3.71	2.7769	1	2.9923	0.21444	1	-1.0127
Sum	31.674	5.9865	1.8626e-07	21.622	5.9983	8.8476e-08	1.2928	4.9629	-17.444
Pounts n	34	34	34	28	28	28	16	16	16
Mean x	0.93159	0.17607	5.4784e-09	0.77222	0.21422	3.1598e-09	0.080798	0.31018	-1.0905
Median	0.6485	0.088233	-0.39559	0.60317	0.14795	-0.25235	0.058589	0.19554	-1.1034
RMS	1.1683	0.28082	0.98518	1.0144	0.33524	0.98197	0.10203	0.44682	1.0911
Std.Deviation s	0.71565	0.22205	1	0.66992	0.2626	0.99999	0.06435	0.33216	0.03743
Variance s ²	0.51216	0.049306	1	0.4488	0.068958	0.99999	0.004141	0.11033	0.001401
Std.Error	0.12273	0.038081	0.1715	0.1266	0.049626	0.18898	0.16088	0.083041	0.0093574
Skewness α	2.1629	2.1626	2.1626	1.8683	1.8682	1.8683	0.8382	0.8382	0.8382
Kurtosis	4.5501	4.5479	4.479	2.8539	2.8537	2.8537	-0.68835	-0.68835	-0.68835

Die Studie von SCHUMANN et al. 2002 greift dieses Phänomen auf und zeigt, daß sich die Reaktionszeit einer Niederschlagsabflußbildung im Khet-Gebiet bereits innerhalb oder sogar noch unter eine Stunde vollzieht. Kreuzkorrelationen zwischen der abhängigen Variable des Abflusses und der unabhängigen Variable des Niederschlags zeigen maximale Korrelation mit 0.7 bei einstündiger Zeitsverschiebung, der Wert sinkt nach zweistündiger Verschiebung auf 0.6 und mit zunehmender Zeitdifferenz weiter ab. In Abb. 4.10 wird dieser Zusammenhang gezeigt. Werden diese Erkenntnisse auf den externen drei mal täglich handgemessenen Zulauf übertragen, muß davon ausgegangen werden, daß dieser nur mit knapp 80% erfaßt wird. Der Meßwert des Zulaufs kann daher mit einer Unsicherheit von ca. 20% eingeschätzt werden, welcher daher als unsicherer Input das Modellergebnis auf jeden Fall beeinflussen wird.

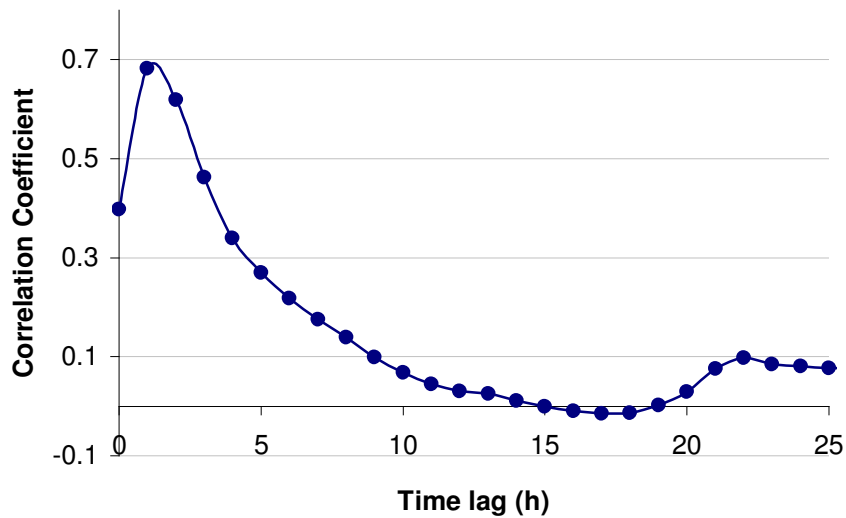


Abbildung 4.10 Kreuzkorrelation am Beispiel des Abflusses und des Niederschlages im Khet-Gebiet (Zeitraum 17.07. – 07.09.2000)

Figure 4.10 Cross-correlation between discharge and precipitation in the Khet catchment (Time period 17.07. – 07.09.2000)

4.1.3 Anpassung der meteorologischen Datensätze

Eine eben so wichtige Variable, wie der zuvor beschriebene Abfluß am Gebietsauslaß ist die meteorologische Größe der Verdunstung, da sie bei der Bestimmung der Wasserhaushaltsbilanz zusammen über das Boden- und Verdunstungsmodul berechnet wird. Zur Validierung werden direkt gemessene Referenzwerte notwendig.

Dieser gemessene Referenzwert (Grundwert des Wasserverbrauchs = E_{pan} in mm/Tag) wurde über den Class-A-Pan Verdunstungskessel ermittelt. Da innerhalb der Datenaufzeichnung Unregelmäßigkeiten festgestellt wurden, mußten die Verdunstungswerte zwischen 20:00 Uhr bis 8.00 Uhr vernachlässigt werden. Für die Vormittagswerte wurde ein gemittelter Wert eingesetzt, der anschließend als Summe zu dem jeweiligen Tag aufaddiert wurde. Auf Grund dieser nicht ganz zufriedenstellenden Datenlage erklärt sich, warum keine stündliche Diskretisierung erfolgen konnte. Die Aufbereitung der täglichen Werte erfolgte unter Berücksichtigung von Niederschlagsabzug aus bzw. Auffüllung in den Tank. Aus diesen Grundwerten lassen sich daraufhin die aktuellen Pflanzenwasserverbrauchsmengen ableiten. Da in den Aufzeichnungen extreme Dateninkonsistenzen aufgedeckt wurden, was in Abb. 4.11 für den Basiswasserverbrauch der Reispflanze (z.B. am 01.07.00) und an den gewählten Modellabschnitten im Anhang (A 4.1 transformierte Verdunstungsermittlung gegenüber Simulationsergebnisse) verdeutlicht werden kann, ist leider eine Validierung nur mit Vorbehalt durchzuführen.

Die tatsächliche Ermittlung des Basiswasserverbrauchs (E_o) der jeweiligen Kulturpflanzen muß jedoch erst angepaßt werden. Hierzu wird der Wasserverbrauch aus dem Kessel (E_{pan}) im ersten Schritt mit empirisch ermittelten Tankkoeffizienten (k_{pan}) und Pflanzenkoeffizienten (k_c) multipliziert $[E_o = E_{\text{pan}} * k_c]$ (DOORENBOS & KASSAM 1979). Der Tankkoeffizient unterliegt verschiedenen Einflußgrößen, wobei dem Wind, der Luftfeuchte und der Entfernung zum Flurstück bzw. zur betrachteten Kulturpflanze besondere Beachtung geschenkt wird. Auch der Pflanzenkoeffizient richtet sich nach diesen klimatisch vorherrschenden Einflüssen. Allerdings ist er aber hauptsächlich auf die spezifischen Entwicklungsphasen der angebauten Kulturpflanze abgestimmt.

Bei der Bestimmung der Koeffizienten hilft die automatische Klimadatenregistrierung. Ein typischer Verlauf bezüglich der Windgeschwindigkeit (u), der Luftfeuchte (H) und der Temperatur (T) wird über den Zeitabschnitt des Jahres 2000 am Beispiel des Khet-Gebiets in Abb. 4.11 gezeigt. (meteorologische Mittelwerte für das Jahr 2000 im Khet: $T = 19.38^\circ\text{C}$, $u = 0.71\text{ m/s}$ und $H = 73.71\%$).

Die Abb. 4.12 zeigt am Beispiel der Reisanbauperiode das Resultat der maximal geschätzten Evapotranspiration, die mittels der oben aufgeführten Koeffizienten und der dadurch reduzierten Kesselverdunstung abgeleitet wurde. Verwendete Koeffizienten, die für die Wasserhaushaltssimulation maßgebend sind, können im Anhang nachgeschlagen werden (Tab. A 4.2). Die in Kap. 3.2 Abb. 3.6 präsentierte Wasserbilanzberechnung basiert auf dieser ermittelten Grundlage des Pflanzenwasserverbrauch. Auf Grund der in Kap. 3.3 dargelegten Auswertung von PUJARA (2000) wurden für das Khet Gebiet hauptsächlich Reis, Kartoffeln und Mais als Anbaukulturen in Betracht gezogen. Diese Kulturen stellen im Folgenden auch für die Simulation die Bezugskulturen da, welche im weiteren Verlauf zur Parametrisierung für die Verdunstungsberechnung in Kap. 6.1 näher untersucht werden.

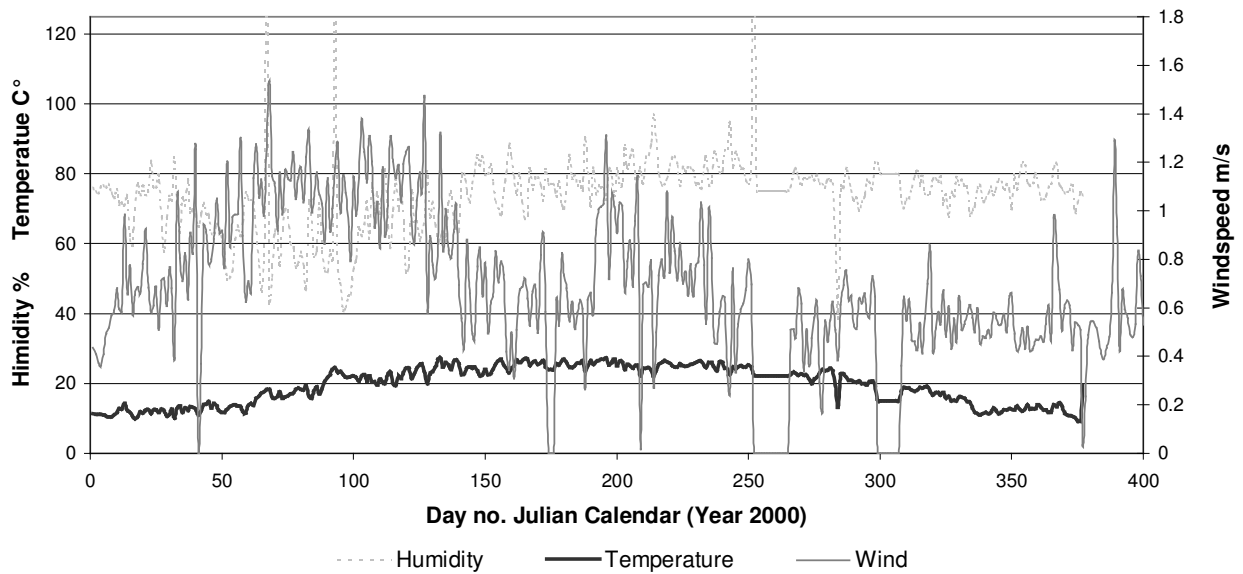


Abbildung 4.11 Verlauf der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchte und der Temperatur im Khet-Gebiet
Figure 4.11 Meteorological data: wind speed, humidity and temperature

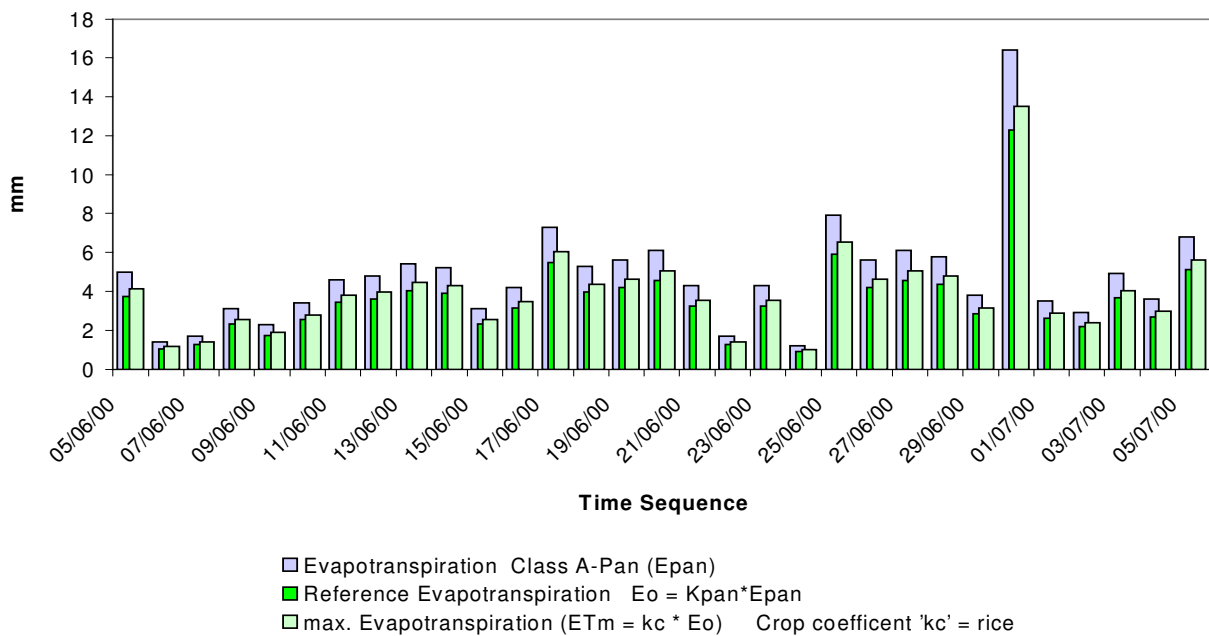


Abb. 4.12 Basiswasserverbrauch am Beispiel der Reisanbauperiode im Khet-Gebiet
Fig. 4.12 Reference evapotranspiration: example rice

4.1.4 Allgemeine Anpassung temporaler Datensätze

Neben dem Modellpaket WaSiM-ETH stehen verschiedene kleine Hilfsprogramme zur Verfügung, mit deren Hilfe die geforderten Datensätze in gewünschte Zeitintervalle diskretisiert werden können. Je nach Fragestellung können beispielsweise die Zeitskalen interpoliert, gemittelt, aufsummiert oder neu aggregiert werden, so daß die Interaktionen der Datensätze analog zu allen anderen meteorologischen Datensätzen abgestimmt werden. Das Gleiche gilt auch für die hydrologischen Datensätze. Die Datensätze werden als Tabellen in die Steuerdatei eingelesen (Interim Report 2001, A.3.2.1.7). Hierbei ist zu beachten, daß alle Stationswerte meteorologischer oder hydrologischer Herkunft das selbe Format besitzen, so daß alle Tabellen in ihren Kopfzeilen die gleichen Informationen besitzen (Höhe, geographischer Position und Stationsname).

4.2 Erfassung, Verarbeitung und Analyse räumlicher Daten

In vielen Entwicklungsländern taucht häufig das Problem auf, planungsnotwendige Kartengrundlagen mit gewünschter flächendeckender Gebietsinformation und übertragbarer Maßstabsauflösung gar nicht oder nur bedingt zur Verfügungen zu haben. Schwer zugängliche oder wenig erschlossene Gebiete müssen oftmals erst noch erkundet und kartografisch erfaßt werden. Dateninfrastrukturen mit leichtem Zugriff wie in der EU sind nicht ohne weiteres auf das Projektgebiet in Nepal übertragbar gewesen. Für die Untersuchung sind daher alle notwendigen Raumeinheiten in Bezug auf die darauf aufbauende Einzugsgebietsmodellierung neu erstellt worden (z.B. topographische Karten, Boden-, Kataster- und Landnutzungskarten sowie hydrologische Karten).

Die topographische Karte stellt für alle folgenden Kartengenerierungen eine unerläßliche Grundlage dar. Alle digitalen Gebietsinformationen für das gesamte Tinipile Tal beruhen auf einer topographischen Karte mit dem Maßstab 1:1000 (s. Anhang A 4.3), die im Rahmen des Projektes von einer nepalischen Firma 1999-2000 aufgenommen wurde. Ihr oblag außerdem die Aufgabe, ältere Katasterkarten aus dem 'Cadaster Office Panchkal' (District Headquater Dhulikhel) anhand mehrere markanter Stützpunkte zu georeferenzieren. Des weiteren wurden Luftbildserien aus dem Jahr 1996 für Landnutzungsinterpretationen herangezogen (*Wild camera* 15/4 UA8-S, 16000 m Höhe, Maßstab ca. 1:10500), die mit freundlicher Unterstützung von ICIMOD zur Verfügung gestellt wurden. Die Luftbilder, die im Rahmen des Projektes „*People and Resourc Dynamics Project* (PARDYP)“ erstellt wurden, erfassen das gesamte Jikhu Khola Einzugsgebiet und bieten zusätzliche Informationen anhand gezielter Luftbildinterpretationen. Anschließend konnten diese wertvollen Erkenntnisse durch Feldbegehungen und örtliche Befragungen verifiziert werden (PUJARA 2000).

Es wurde auf *Scans* der topographischen Kartenblätter zurückgegriffen (A0; 300dpi [*dots per Inch*]) die als Bilddokumente (*images* bzw. *tif.files*) abgespeichert wurden. Anschließend sind die Konturlinien aus dem topographischen Kartenabbild abdigitalisiert und die Kartenblätter Blatt für Blatt verbunden worden (Arc/Info-GIS). Das so gewonnene digitale Höhenmodell (*DHM*) bildet die Basis für alle weiteren thematischen Kartengenerierungen.

Für die verwendete Modellkonstellation wurden bis zu neunzehn Rasterkarten (Standardgrids) erstellt. Dieses kommt einer minimal räumlichen Datenanforderung der geographischen Daten gleich. Das WaSiM stützt sich im Wesentlichen neben dem *DHM* auf folgende Gebietsinformationen: Gefälle, Exposition, Fließzeiten, Zonengrid für das Bodenmodell, Bodentyp, Landnutzung, maximaler Wasserüberstau und Bewässerungscode. Alle räumlichen Datensätze müssen für das zu modellierende Einzugsgebiet als flächendeckende Grids in gleicher Auflösung und mit gleichen Eckkoordinaten vorliegen (Interim Report 2001, A.3.2.1.7). Für die hydrologische Modellierung wurde eine einheitliche horizontale Raterauflösungen der Gebietsinformation von 10 m x 10 m gewählt.

Spezielle WaSiM-„Helptools“ ermöglichen die Konvertierung von *ASCII* - in *BINAREM* – Format.

4.2.1 Topographische Analyse

Da viele geometrische Daten mittels topographischer Analyse vom digitalen Höhenmodell (*DHM*) hergeleitet werden können (MEIJERINK et al. 1994), wurde die Einzugsgebietsgrenze für das Untersuchungsgebiet Khet über ein speziell hierfür vorgesehenes Hilfsprogramm TANALYS approximiert und generiert (SCHULLA & JASPER 1999). Die unterschiedlichen thematischen Kartengenerierungen wurden im binären Code ausgelesen und sind damit direkt für die notwendigen Eingabestandardgrids (Input) im WaSiM kompatibel (s. Abb. 1.2). Auf diese Weise lassen sich folgende topographische Analysen erstellt: Gefälle, Exposition, Fließrichtungen, Fließakkumulationen, Fließzeiten, Flußnetzinterpretationen, Flußordnungen und -nummern, Teileinzugsgebiete u.s.w.. Durch Transformation in das ASCII-Format lassen sich alle generierten Rasterkarten in ARC/VIEW einlesen und visualisieren. Die Abb. 4.13 zeigt hierzu ausgewählte Beispiele für das Untersuchungsgebiet. Es werden einerseits Fließrichtungen, Flußnetzgenerierungen und Einzugsgebietsgrenzen, andererseits Gefälle, potenzielle Einzugsgebietsabschätzungen mit Teileinzugsgebieten sowie Codierungen für modellrelevante Flußnummerierungen gezeigt. Vorteil dieser topographischen Analyse ist, das zugleich Routingvorschriften in tabellarischer Form abgeleitet werden, welche Informationen über baumartige Entwässerungsstrukturen des Gerinnes oder des relevanten Teilgebietes mit spezifischen hydraulischen Parametern enthalten. Diese produzierten Routingvorschriften lassen sich in die Steuerdatei des WaSiM Abflußroutingmodules schreiben und dort weiter verarbeiten.

Zur mathematischen Fundierung sei hier als weiterführende Literatur neben der Modelldokumentation von SCHULLA (1997) und SCHULLA & JASPER (1999) auch MEIJERINK et al. (1994) genannt, in der die Grundprinzipien der einzelnen topographischen Standardverfahren ausführlich erläutert werden.

Der Umfang jeder Analyse kann in der Steuerdatei des TANALYS-Hilfsprogramms beispielsweise durch ein- oder ausschalten der Ignoranzparameter festgelegt werden. Die Parameter zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit, insbesondere der hydraulischen Rauigkeit können oft nur aus Erfahrungen geschätzt werden oder aus stichprobenartigen Messungen verallgemeinert werden. Daher sollten über die gesamten Fließstrecken effektive Parameter gefunden bzw. kalibriert werden. Eine Parameteranpassung wurde beim Rauigkeitsbeiwert, bei einer anfänglich geschätzten Abflußspende und einem gewählten Schwellenwert (Einflußbereich in Gridanzahl) für Fließakkumulationen erforderlich. Abb. 4.13 g.) zeigt die Zerlegung des Einzugsgebietes in Teileinzugsgebiete, die auf dem fest-zulegenden Einzugsbereich abflußwirksamer Gridzellen beruhen. Die Gebietsauslaufpunkte (Pegel-Koordinaten) werden in ein Grid hinein editiert, da diese Information für den Programmablauf vorgegeben werden muß. Auf Grundlage des *DHM*-Initialgrids und Wahl seiner Diskretisierung kann eine gröbere Rasterauflösung, im Gegensatz zu einer sehr feinen, eine Verkleinerung des Einzugsgebietes durch Abrundung bewirken. Im Beispiel Abb. 4.13 f.) kann dieser Einengungseffekt verdeutlicht werden.

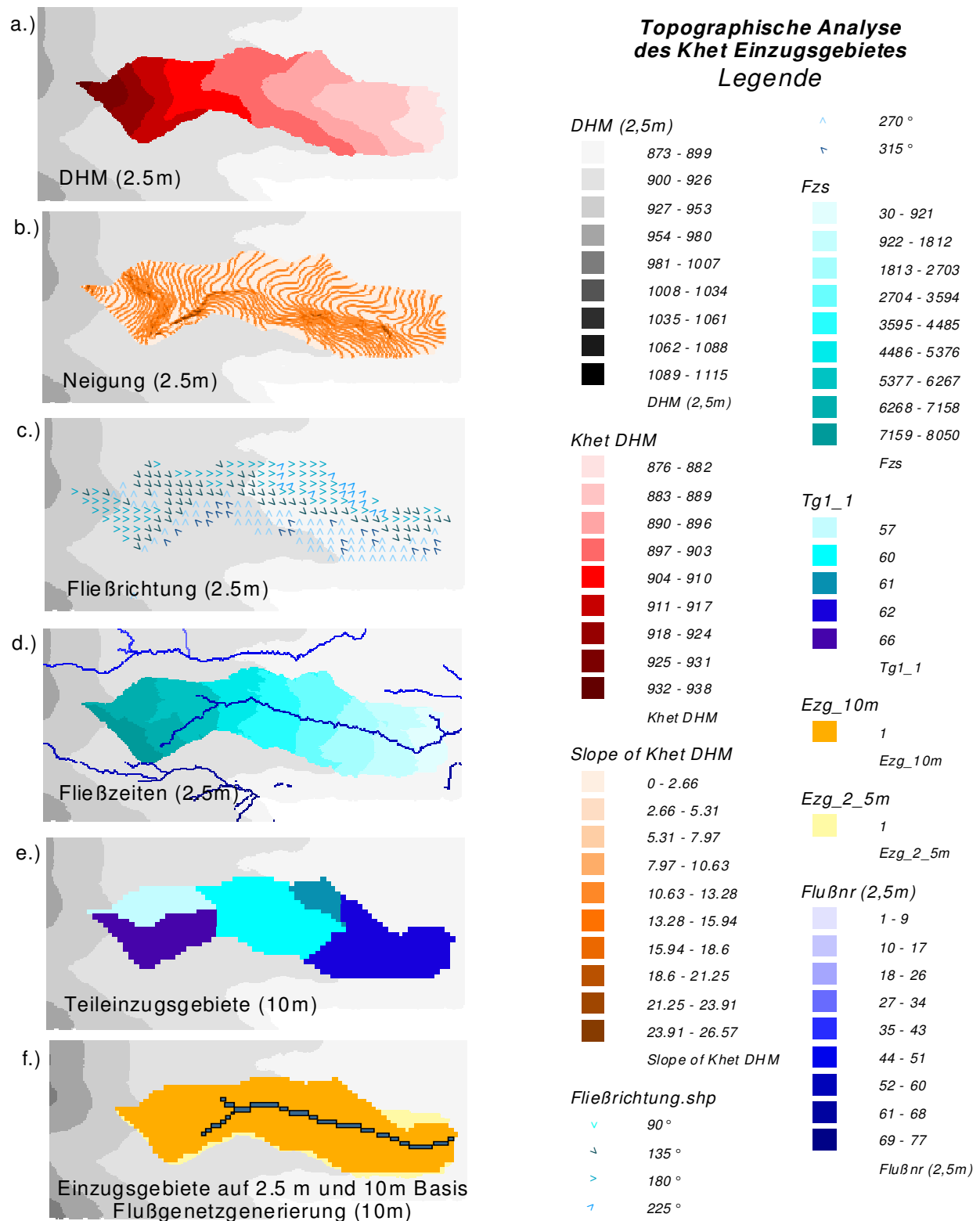


Abbildung 4.13 Topografische Analyse für das Khet-Einzugsgebiet
(untereinander: DHM, Gefälle, Fließrichtung, Fließzeiten mit Fließnetz-
generierung, Teileinzugsgebieten und Einzugsgebietsvergleich)
Figure 4.13 Topographic analysis in Khet-catchment with: digital elevation Model/DEM;
slope, flow direction, flow time with flow net generation, sub catchments and
catchments)

4.2.2 Ermittlung der Bodenkennwerte durch räumliche Strukturanalyse

Die räumliche Datengrundlage zur Bestimmung der Bodenbeschaffenheit beruht zum größten Teil auf einfache *in situ* Fingerproben tests und ist somit im überwiegenden Maße indirekt ermittelt worden. Für diese Daten liegen neben genauen Koordinatenangaben auch Flurabstandsbestimmungen des Stichtages und zusätzliche grobe Farban sprachen vor (LESEBERG 2000). Dieser Datentyp entspricht laut SCHAFMEISTER (1999) einem „weichen“ Datentyp. „Harte“ Daten enthalten zusätzlich die im Labor ermittelten Werte, wie beispielsweise die hydraulische Leitfähigkeit (k -Werte) und Speicherfähigkeit des Bodens. Auf die modellrelevante Herleitung dieser bodenhydraulischen Parameter und deren Zustandsvariablen wird im Kap. 6.2 näher eingegangen. Es werden typische Bodenprofile untersucht und einzelne ungestörte Proben entnommen, die im Labor auf Repräsentativität im Vergleich zu den bereits vorliegenden „weichen“ Daten geprüft wurden. Eine Zusammenstellung der Laboranalyseergebnisse findet sich im Anhang (A 6.2). Im Khet-Gebiet konnten Bodenproben verstreut, aber dennoch flächenhaft aufgenommen werden (Abb. 4.14), so daß an Hand von Schätzungsmethoden die räumliche Verteilung der Böden und die physikalische Bodenbeschaffenheit idealisiert werden konnte.

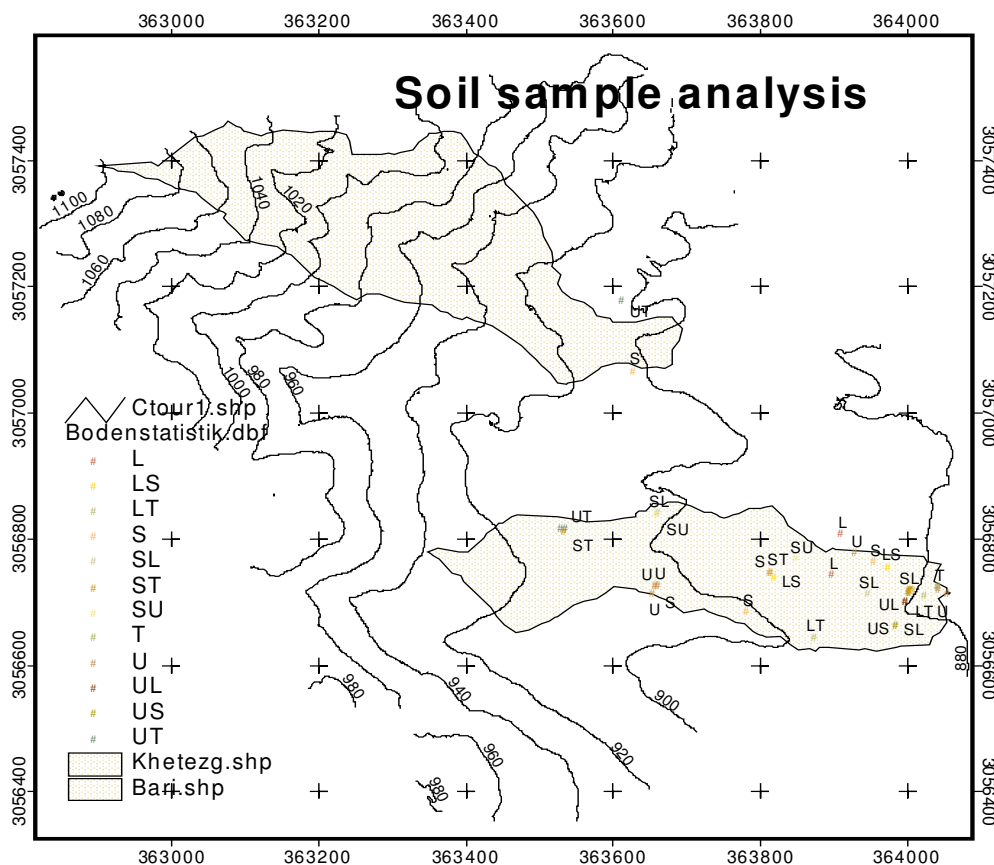


Abbildung 4.14
Figure 4.14

Probenahmestandorte für Bodenkennwerte
Soil sample analysis

Die Karte in Abb. 4.14 zeigt die Dichte des aufgenommenen Stichprobenrasters (Stützstellen = *support*) und benennt die dort ermittelten dominanten Kornfraktionen.

Die Auswertungen vor Ort ergaben folgendes Bild: die Texturbeschaffenheit der oberen Bodenschichten schwankt zwischen sandigen Schluffen bis hin zu lagenweise auftretenden Tonen. Die Anteile der Kornfraktionen im Oberboden wurden mit 51% Sandfraktion, 25% Schluff, 20% Lehm und 4% Ton bestimmt. Mit zunehmender Tiefe steigen Tonanteile auffallend: 20% Sand, 20%, Schluff, 33% Lehm und 33% Ton (INTERIM REPORT 2001 A 3.2.1.4). Wenn ein generalisierter Boden pauschal gemäß Mischproben als Modellbasis herangezogen würde („Einheitsboden“), entspräche dieser einem kompakten bzw. bindigen Boden der Klasse sandiger Lehm `Ls` bzw. nach der US-Soil Taxonomy *Clay Loam*, der sich in die Tiefe mehr und mehr durch Schluff- und Lehmenteile auszeichnet.

Die Modellierung benötigt Rasterkarten (Gitterdatenstruktur) mit räumlich genau definierten Bodenschlüsseln und entsprechenden Bodenwasserleitfähigkeiten, die für den Bodenwasserfluß im Zusammenhang mit dem Bewässerungsmodul eingelesen werden (ggf. auch zur Ermittlung des topographischen Indexes). Dabei werden aus den Rohdaten (Primärdaten) die Kennwerte im Labor abgeleitet und die auf diese Weise gewonnenen Punktdaten (Sekundärdaten) in Flächendaten transformiert (Kap. 6.2).

Es gibt unterschiedliche Lösungsmethoden, um eine räumliche Beziehung zwischen Punktmessungen herzustellen, wobei das tatsächliche Verhalten eines zu beschreibenden Phänomens interpoliert oder sich durch Approximation der Realität nähert. Zu den deterministischen Interpolationsansätzen zählen lineare Interpolation, gewichtetes Mittel und multiquadratische Interpolationen. Bei der Interpolation können aber auch die Stützpunkte über berechnete Funktion exakt angepaßt werden, (wie z.B. durch Polynome, Splines oder Bézierkurven), oder aber die berechneten Funktionen werden an die Stützpunkte angenähert (wie z.B. durch die Methode der kleinsten Quadrate). Außerdem können auch geostatistische Interpolationsverfahren benutzt werden (wie z.B. der spezielle Ansatz mittels Variogramm mit anschließendem Interpolationsverfahren nach Kriging). Geostatistische Verfahren werden als besonders gut geeignet befunden, da diese Verfahren, unter Einbeziehung des Raumbezuges, Zusammenhänge zwischen den Objektmerkmalen analysieren (BILL 1999, SCHAFMEISTER 1999; MEIJERINK 1994). Hierzu zählen insbesondere bodenphysikalische Eigenschaften, die in der Natur unberechenbar variieren oder sogar als stochastische Variabel auftreten (respektive: Infiltration, ungesättigtes Bodenwasserpotential, Durchlässigkeit, Bodenfeuchtegehalt).

Bei der Eignungsprüfung der unterschiedlichen Schätzverfahren zeigte sich, das sie zwar zur räumlichen Integration der punktuell vorliegenden Stützstellen verwendet werden können, aber nicht alle Verfahren optimal die gravierenden Sprünge und Ausreißer in den eng aneinander liegenden Wertebereichen verarbeiten können. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in der Abb. 4.15 b, c, d veranschaulicht.

Offensichtlich erscheint das traditionelle Abstandsgewichtete Interpolationsverfahren (inverse Distance Weighting/IDW) die glaubwürdigsten Ergebnisse zu generieren, denn dieses Verfahren eignet sich besonders gut, sowohl bei der Clusterung einzelner Datenpunkte (stellenweise hoher Datendichte), als auch bei Daten mit steilem Gradientenwechsel. Gerade bei den Leitfähigkeiten sind Schwankungen im Wertebereich von Zehnerpotenzen ($10 \cdot E^{-5}$ bis $10 \cdot E^{-8}$) keine Seltenheit, welches bei anderen Verfahren bisweilen zu Berechnungsschwierigkeiten oder sogar zum Abbruch der Berechnung führte.

Dagegen zeigte sich, daß das Kriging-Verfahren scharfe Grenzen ignoriert, die aber in der Natur und insbesondere im vorliegenden Fall bei den ermittelten Bodenkennwerten existieren. Um dieses Problem zu umgehen, mußte eine Glättung bzw. Ausdünnung der Stützstellen bis auf 20 Datenpunkte vorgenommen werden, bis schließlich die räumliche Variabilität interpoliert werden konnte und als Rastermuster auf die Oberfläche übertragen werden konnte. Eine logeritmische Transformation der k -Werte vereinfachte schließlich den Kalkulationsprozeß. Schon bei der Betrachtung des Histogramms in Bezug auf die Zusammensetzung der Bodenkennarten (Abb. 6.10), auf die in Kap. 6.2 noch eingegangen wird, wurde eine ausgeprägte Heterogenität beobachtet. Derartige Bodeneigenschaften führen häufig zu geostatistischen Verarbeitungsschwierigkeiten (SCHAFMEISTER 1999). Die deutliche bimodale Verteilung der Kornfraktionsverteilung zeigt, daß die räumliche Struktur (Bodenkennwert k) im Untersuchungsgebiet ein anisotropes Verhalten aufweist. Dieses wird ferner auch durch den deutlich abweichenden („zickzack“) Kurvenverlauf im Variogramm mit unterschiedlichen Raumrichtungen untermauert (Abb. 4.15d), ganz gleich welche Modellfunktion getestet wurde (*spherical* oder *gaussian*).

Die Anwendung gewöhnlicher Spline-Interpolations Verfahren bereitet ebenfalls während der Rechenvorgänge Probleme. Dieses wurde durch die gewaltigen ‘*over- oder undershootings*‘ hervorgerufen, die schließlich auch negative bzw. sehr unglaubliche Schätzungen hervorbrachten. Dagegen reagierte jedoch das AKIMA-Verfahren ein wenig stabiler.

Das AKIMA-Verfahren führt computertechnisch betrachtet zwar zu schnellen Ergebnissen und zeigt gute Rechenzeit- und Speicherplatzeffizienz, aber ist ebenfalls in Bezug auf die Variabilität der Leitfähigkeiten nicht in der Lage die großen Wertespannweiten auf kurzer Distanz zu verarbeiten. So werden Ausreißer im Datensatz über oder unterschätzt (*over- or undershooting*). Diese Methode eignet sich deshalb für sanft oszillierende Oberflächen (wie beispielsweise Konzentrationsausbreitungen und/oder Isolinien). Zudem ist diese Formel auch in den Randintervallen nicht unmittelbar geeignet, allerdings könnten aus den Daten auf beiden Seiten je zwei Datenpunkte geschätzt werden, die einem parabelförmigen Kurvenverlauf entsprechen.

Die Abbildungsserie zeigt zunächst in Abb. 4.15a die Ausgangssituation, wobei im Einzugsgebiet Khet die Stützstellen mit ihren ermittelten Bodenarten gezeigt werden. Jede Stützstelle ist durch x- und y-Koordinaten lokalisiert und in einer Tabelle abgespeichert. Dazu werden in dieser Tabelle die Bodenansprachen und gesättigten Leitfähigkeiten festgehalten. Diese Quelldaten stellen die Ausgangsbasis für die nacheinander folgenden Interpolationsverfahren dar (Abb. 4.15b–d). Dabei lassen sich erhebliche Unterschiede in der flächenhaften Beschreibung erkennen. Die Abb. 4.15b zeigt die Abstandsgewichtete Interpolation IDW, Abb. 4.15c zeigt ein Beispiel auf Basis des Spline-Interpolations Verfahrens, die generell zur räumlichen Strukturanalyse innerhalb der GIS-Anwendung genutzt wird und in Abb. 4.15d wird die Anwendung des geostatistischen Verfahrens (statistische Interpolation) nach Kriging wiedergegeben.

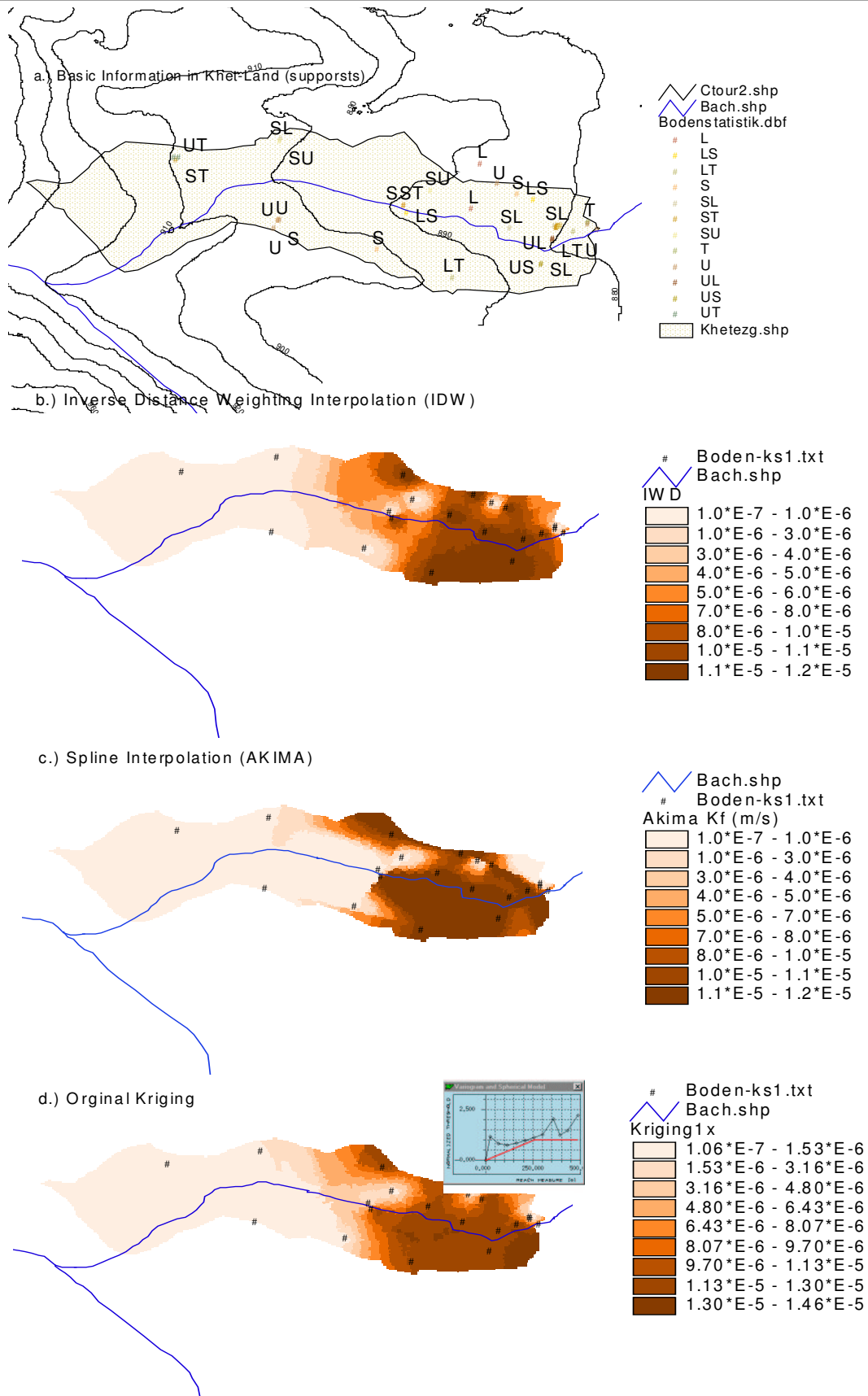


Abbildung 4.15 a-d Alternative Verfahren zur räumlichen Strukturanalyse für Bodenkennwerte (k -Werte [m/s]) am Beispiel des Khet-Land-Einzugsgebiets

Figure 4.15 a-d Alternative procedures for spatial structure analysis regarding to their soil properties (k -values [m/s]) in the Khet-land catchment

Um zukünftig Unsicherheiten in den Abschätzungsverfahren zu reduzieren, ist auf jeden Fall die akkurate Schätzung von der Strategie der Probenahme und Analyse abhängig (WARRICK et al. 1999; gut durchdachtes Probenahmemuster). Da die Aufnahme ausreichender Felddaten oft an ökonomische Grenzen stößt und das genutzte Probenahmemuster zunächst für Grundwasserprospektionen, nicht aber für Bodenkartierungszwecke aufgenommen wurde, zeigt sich im Nachhinein deutlich, dass in einigen Bereichen des Untersuchungsgebietes eine größere Auflösung der Referenzstützstellen notwendig gewesen wäre, um die Bodenheterogenität besser zu erfassen. Die flächenhafte Beschreibung durch das IDW-Verfahren ist bei dieser gegebenen Datenausgangslage und vermuteter Heterogenität des Bodens ausreichend. Im Anwendungsbeispiel kann daher gezeigt werden, daß nicht alle Probleme eines ausgeklügelten, weit entwickelten Interpolationsverfahrens bedürfen müssen.

4.2.3 Übertragung der Landnutzung

Die Landnutzungskartierung basiert auf den in Kap. 4.2 erwähnten Luftbildern. Der Luftbildmaßstab wurde an Hand der in der Randmarke ausgewiesenen Kammerkonstante (Brennweite) und Flughöhe errechnet, welches einen Maßstab von ca. 1:10500 ergab. Die Luftbilder wurden ebenfalls photometrisch abgetastet (scan - A0; 300dpi [*dots per inch*]) und als Bilddokument abgespeichert. Mit Hilfe des Geo-Informationssystems ARC/INFO wurden die Bilder georeferenziert, so daß sie schließlich mit dem digitalen Höhenmodell und einer Katasterkarte mit ausgewiesenen Flurstücken übereinstimmten (s. Abb. 4.16).

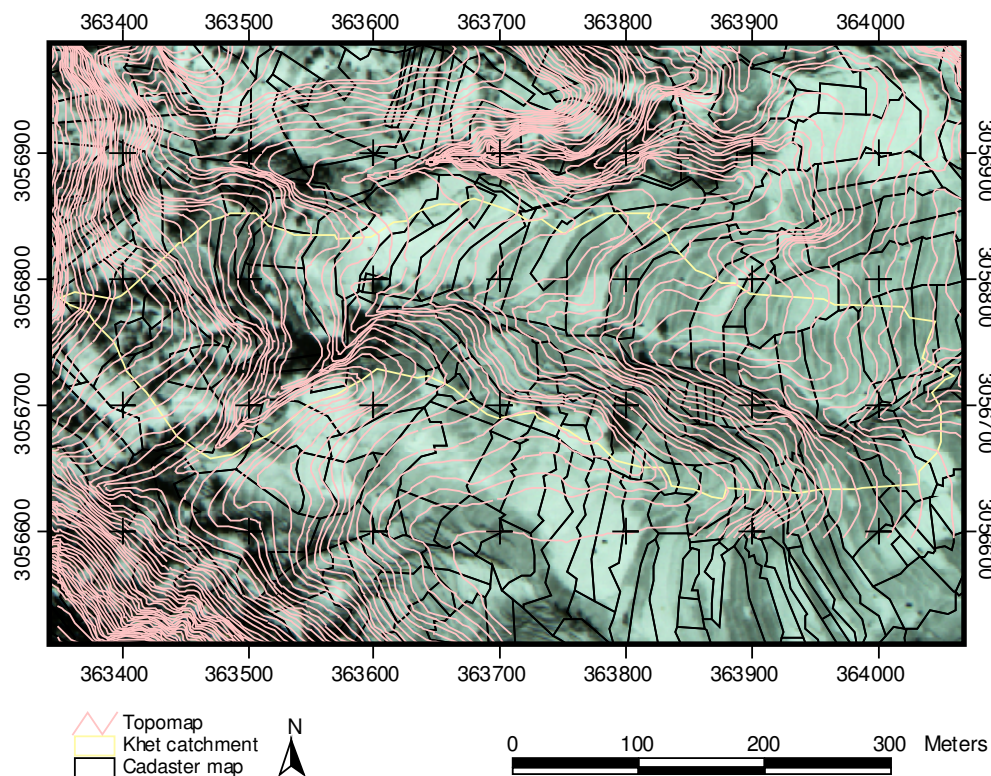


Abbildung 4.16 Georeferenziertes Luftbild vom Untersuchungsgebiet
Figure 4.16 Georeferenced aerial photograph from the investigation area

Zunächst wurde eine Grauwertanalyse der Luftbilder vorgenommen, wobei verschiedenen Grauschattierungen bestimmte Landnutzungstypen gemäß der Kartierung und zusätzlichen Evaluierung vom PUJARA (2000) zugeordnet wurden (s. Abb. 3.8). Die Landnutzungstypen wurden wiederum mit spezifischen Codenummern klassifiziert und in GIS-Karten dargestellt. Die Abb. 4.17 zeigt die schrittweise Generierung der flächenhaften Landnutzungsinterpretation am Beispiel des Khet-Einzugsgebietes.

Die anfänglich kleinflächig vorliegende Dateninformation wurde durch Bildung von Flächensummen und Flächenmittelwerten über größere Räume integriert. Die Abb. 4.17c

zeigt, daß die räumliche Struktur durch die Aggregation von 2.5 m Raster auf 10 m Raster stark verändert und vereinfacht wurde.

Da das Landnutzungsgrid, ebenso wie Bodengrid, Zonengrid und andere zu den Standardgrids des Modells WaSiM zählt (s. SCHULLA & JASPER 1999), hat gerade die Landnutzungscodierung besondere Bedeutung. Die Codierung dient den Teilmodellen, insbesondere dem Verdunstungsmodul, zur Identifikation der Rasterzellen. Jeder einzelne Code-Index hat die Aufgabe spezifische pflanzenphänologische Informationen in der Steuerdatei aufzufinden (z.B. Blattflächenindex/LAI, Wuchshöhe, Wurzeltiefe; Wachstumszyklus ...). Es gilt daher möglichst zeitechte Pflanzenparameter zu ermitteln und diese an die einzelnen Code zu koppeln. Die pflanzenphänologischen Informationen sind zeitveränderliche Parameter und sollten in jedem Fall durch Feldtests für jede betrachtete Kultur ermittelt werden. Daher wird der Bestimmung des LAI's an andere Stelle besondere Aufmerksamkeit zu Teil werden und neben anderen relevanten Modellparametern im Kapitel 6.1 näher erläutert.

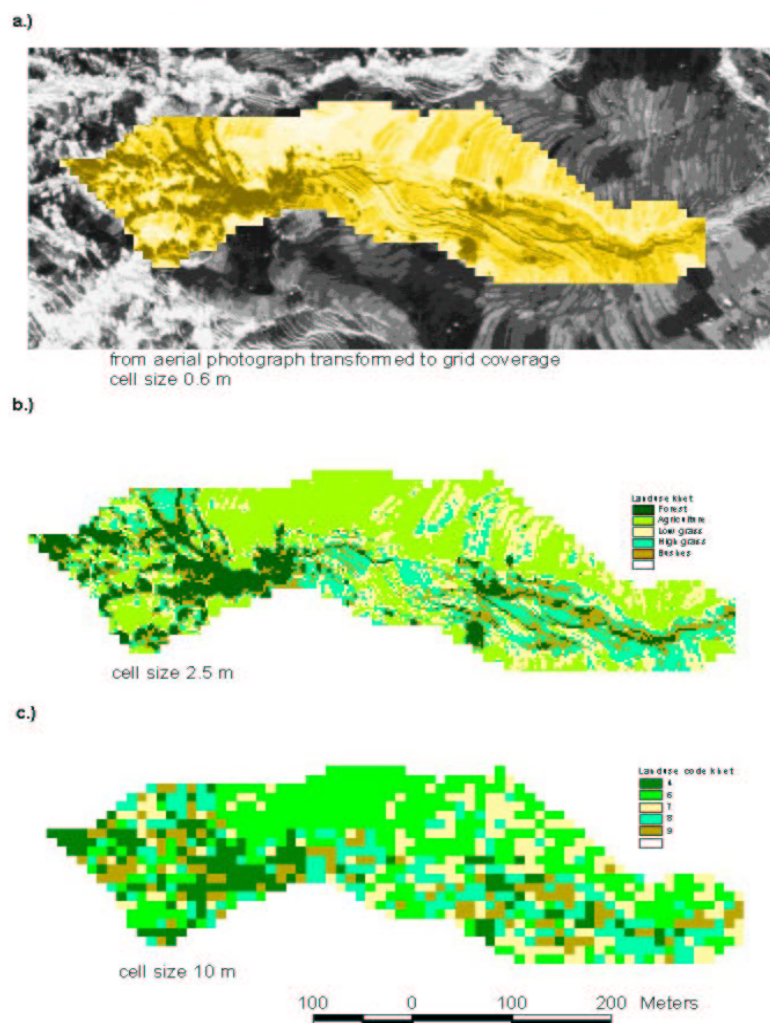


Abb. 4.17 Kartengenerierung der räumlichen Landnutzungsinformation
a. Luftbild transformiert, Basisraster 0.6m
b. Landnutzungscodierung, aggregiert auf 2.5 m
c. Landnutzungscodierung, aggregiert auf 10 m

Figure 4.17 Map generation for spatial land use information
a. aerial photographs, grid size 0.6 m
b. land use coding, aggregated to 2.5 m
c. land use coding, aggregated to 10 m

5 Genutzte Modellkomponenten

5.1 Berechnung der Verdunstung

Die Verdunstung ist eine wesentliche Ausgabegröße in der Wasserhaushaltsbilanzgleichung und besitzt eine regulierende Wirkung auf den Wärmehaushalt. Durch die Einbeziehung der Verdunstungsabschätzung in die Wasserhaushaltsgleichung kann beispielsweise das nutzbare Wasserdargebot, der Wasserverbrauch, Gewinn oder Verlust, Rücklage oder Aufbrauch im betrachteten hydrologischen System quantifiziert werden. Bei ihrer Berechnung ist zwischen der potentiellen und aktuellen Evapotranspiration zu unterscheiden. Die potentielle Evapotranspiration ist die maximale Menge Wasser, die pro Zeiteinheit bei gegebenen meteorologischen und pflanzenphysiologischen Bedingungen aus dem Boden direkt und/oder über die Pflanzen in die Atmosphäre transferiert wird. Dabei ist die unbeschränkte Wasserversorgung der verdunstenden Fläche Grundvoraussetzung. Die aktuelle Evapotranspiration ist die von der Landoberfläche bei vorhandener Energie- und Wasserdargebot tatsächlich verdunstete Wassermenge.

Im Modellsystem werden die Verdunstungstypen anhand gekoppelter mathematischer Ansätze nachvollzogen, damit gleichermaßen potentielle und aktuelle Evapotranspiration erfaßt werden können. Zunächst wird der Basiswasserverbrauch, d.h. die potentielle Evapotranspiration, berechnet. Anschließend erfolgt die Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration im Modell über eine Kombination von Boden- und Pflanzenverdunstung, die in zwei Schritten, d.h. erst über die potentielle Verdunstung und dann über ihre Reduktion, entsprechend dem limitierten Feuchteangebot im Boden, berechnet wird (Nutzung der feuchteabhängigen Reduktionsfunktion innerhalb des Bodenmodells (GURTZ 1988) bzw. des RICHARDS-Ansatzes).

Das Modellsystem WaSiM-ETH bietet wahlweise verschiedene Verdunstungsansätze zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration an, die der Anwender gemäß seiner Datenausgangslage modular auswählen kann. Für die vorliegenden Modellszenarien wird die Verdunstung nach dem Verfahren von PENMAN-MONTEITH bestimmt. Die PENMAN-MONTEITH-Gleichung ist eine Weiterentwicklung der PENMAN-Gleichung. Sie wird gegenwärtig in komplexen hydrologischen Modellen bevorzugt eingesetzt, da sie physikalisch begründet ist. Zur Beschreibung der Verdunstung werden als Eingangsvariablen neben meteorologischen und phänologischen auch bodenphysikalische Daten verwendet

Das Kombinationsverfahren von PENMAN ist schon oft beschriebene worden (PENMAN 1948; BRUTSAERT 1982; BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1990; u.a.). Das hieraus hervorgegangene modifizierte Verfahren nach PENMAN-MONTEITH wurde bereits erfolgreich in viele hydrologische Modelle eingebaut wie z.B. in das SWACRO (FEDDES et al. 1978) oder in das HBVEVATH (GURTZ 1997) und bewährt sich nun auch im Modellsystem WaSiM-ETH mit nachfolgender Grundgleichung (MONTEITH 1975):

$$\lambda E = \frac{3.6 \cdot \frac{\Delta}{\gamma_p} \cdot (R_N - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{\gamma \cdot r_a} (e_s - e) \cdot t_i}{\frac{\Delta}{\gamma_p} + 1 + r_s / r_a} \quad (1)$$

mit	λ	latente Verdunstungswärme $\lambda = (2500.8 - 2.372 \cdot T) \text{ KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$, T : Temp. in °C
	E	Fluß latenter Wärme in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \equiv \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \rightarrow [\lambda E] = \text{KJ} \cdot \text{m}^{-2}$
	Δ	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve $[\text{hPa} \cdot \text{K}^{-1}]$
	R_N	Nettostrahlung, umrechnen von $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ in $\text{KJ} \cdot \text{m}^{-2}$ durch Faktor 3.6 $[\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}]$
	G	Bodenwärmefluß (pauschal 0.1 bis 0.2 $\cdot R_N$) $[\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}]$
	ρ	Dichte der Luft $= p/(R_L \cdot T)$ (bei 0 °C und 1013,25 hPa: $\rho = 1.29 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^{-3}]$)
	c_p	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck $c_p = 1.005 \text{ [KJ} \cdot (\text{Kg} \cdot \text{K})^{-1}]$
	e_s	Sättigungswasserdampfdruck bei aktueller Lufttemperatur $[\text{hPa}]$
	e	aktueller Wasserdampfdruck $[\text{hPa}]$
	t_i	Anzahl Sekunden im Berechnungsintervall
	γ_p	Psychrometerkonstante $[\text{hPa} \cdot \text{K}^{-1}]$
	r_s	Bestandswiderstand bzw. Bulk-Oberflächenwiderstand $[\text{s} \cdot \text{m}^{-1}]$
	r_a	Bulk-aerodynamischer Widerstand $[\text{s} \cdot \text{m}^{-1}]$

Die komplexe Gleichung setzt sich aus einem Strahlungs-Term (Energiefluß/ E latenter Wärme $[\text{KJ} \cdot \text{m}^{-2}]$) und einem Aerodynamik-Term (Grenz- und Stomatawiderstand r_s und r_a $[\text{s} \cdot \text{m}^{-1}]$) zusammen. In Analogie zur Elektronik führte MONTEITH (1965) somit bei der Verdunstungsmodellierung Widerstandsformulierungen ein. Damit lassen sich pflanzenphysiologische Regelungen und rein physikalische Wirkungen des Phänotyps auf turbulenten Austausch von Wasserdampf in die Atmosphäre beschreiben, womit eine Aufteilung der zur Verfügung stehenden Energie in fühlbaren und latenten Wärmeflüssen vorgenommen werden kann. Dadurch wird die Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration unter den spezifischen Bedingungen des Standortes, der Vegetation und der Witterung möglich. Die Widerstände gelten solange, wie die Vegetation genügend Wasser durch ihre Wurzeln aufnehmen kann. Die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration muß durch Anwendung eines Ausschöpfmodells der Bodenfeuchte erfolgen.

Um die komplexe Gleichung lösen zu können, werden die einzelnen Terme, die als Abkürzungen mit komplexen Inhalten zu sehen sind (Nettostrahlung, Sonneneinstrahlung, Ventilations-Feuchteglied, Windgeschwindigkeit), wie mathematische Bausteine im Modell auseinander gelegt und, wenn erforderlich, abgearbeitet. Auf diese Weise können die zu bestimmenden oder noch fehlenden Variablen Schritt für Schritt berechnet und über Parameter angepaßt werden. Anschauliche Beispiele zur Approximation der Strahlungsbilanz finden sich in der Modelldokumentation von SCHULLA & JASPER (1999); SCHULLA (1997) und GURTZ et al (1997). Die Anwendung der Gleichungsbausteine richtet sich daher immer nach den vorgegeben Eingangsinformationen.

Die wichtigsten Parameter zur Anpassung der PENMAN-MONTEITH Verdunstungsformel sind: Albedo, Extinktionfaktor, Temperaturamplituden, Bestandswiderstände der betrachteten Kulturpflanzen und weitere pflanzenphänologische Parameter wie Wurzeltiefe, Bestandshöhe, Bedeckungsgrad, jahreszeitlicher Vegetationsverlauf und Pflanzenwachstumsphasen sowie Blattflächenindex (LAI).

Die beschriebenen Algorithmen setzen voraus, daß alle nötigen meteorologischen Eingangsvariablen in zeitlich identischer Auflösung zur Verfügung stehen (vgl. Kap. 4.1.4). Optimale Voraussetzung zur Anwendung des PENMAN-MONTEITH Ansatzes ist gegeben, wenn die folgenden sechs Zeitreihen in täglicher oder noch besser in kürzerer Zeitauflösung (z.B. stündlich oder kleiner) vorliegen:

- ⇒ Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$),
- ⇒ relative Luftfeuchte (1/1) oder
- ⇒ Dampfdruck (hPa),
- ⇒ Windgeschwindigkeit ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
- ⇒ relative Sonnenscheindauer (1/1) und
- ⇒ Globalstrahlung ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$)

Kann diese Ausgangslage nicht realisiert werden, können letztere, wie entweder die relative Sonnenscheindauer oder die Globalstrahlung notfalls über die o.g. Gleichungsbausteine ermittelt werden. Sollte darüber hinaus der Luftdruck nicht direkt gemessen worden sein, besteht die Möglichkeit, einen mittleren Luftdruck über die barometrische Höhenformel (SCHULLA 1997) zu berechnen. Jedoch sind zur Anpassung der Widerstandsformel die Bestimmung der pflanzenphänologischen Parameter Voraussetzung. Entsprechende Erläuterungen zu ihrer spezifischen Ermittlung und Bereitstellung werden im Kap. 6.1 behandelt, wo zu jeder Landnutzungsform ein eigener Parametersatz erstellt wird.

5.2 Berechnung der Wasserfließwege im Bodenmodul

Im Modellpaket WaSiM-ETH kann zur Berechnung des vertikalen Bodenwassertransportes zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Modulen gewählt werden. Zum Einen gibt es die Möglichkeit den generalisierten TOPMODEL-Ansatz nach BEVEN et al. (1995) zu verwenden, zum Anderen steht die klassische, physikalisch basierte (Bodenwasser-) Fließgleichung, bekannt als RICHARDS-Gleichung, zur Verfügung (SCHULLA & JASPER 1999).

Für das bewässerte Einzugsgebiet im Khet-Land ist die Berechnung der eindimensionalen vertikalen Wasserbewegung in die ungesättigte Zone mit dem RICHARDS-Ansatz durchgeführt worden, da nur mit diesem Ansatz eine Interaktion zwischen Bewässerungs- und Bodenmodul hergestellt werden kann. Zur Beschreibung der gesättigten Zone können alternativ zwei Module zugeschaltet werden, die entweder als Basisabflußspeichermodell oder durch ein zweidimensionales Grundwassermodell simuliert werden.

Die RICHARDS-Gleichung im Bodenwassermodell, die aus der Kontinuitätsgleichung für die eindimensionale vertikale Wassersbewegung in der ungesättigten Zone hervorgeht, nimmt folgende Form an:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-k(\Theta) \frac{\partial \Psi(\Theta)}{\partial z} \right) \quad (2)$$

mit	Θ	Wassergehalt [m^3/m^3]
	t	Zeit [s]
	k	hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
	Ψ	hydraulische Höhe als Summe aus Saugspannung ψ und geodätischer Höhe h [m]
	q	spezifischer Fluß [m/s]
	z	Vertikalkoordinate [m]

Die obige partielle Differenzialgleichung mit entsprechenden Anfangs- und Randwertbedingungen wird eindimensionalvertikal durch ein Finites-Differenzen-Verfahren gelöst. Hier wird sie für jede Gridzelle der zu diskretisierenden Bodensäulen schichtweise angewendet. Daher wird zur Beschreibung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone der Boden aus numerischen Gründen in zahlreiche Schichten unterteilt, die alle mit den gleichen bodenphysikalischen Eigenschaften und der gleichen Mächtigkeit ausgestattet sind (s. Bodenparametertabelle 6.4 in der Steuerdatei im Kap. 6.2). Zwischen zwei Diskretisierungsschichten mit beliebiger Schichtdicke kann auf diese Weise der Fluß (q_{in} , q_{out}) in Abhängigkeit der hydraulischen Bodenparameter vom Wassergehalt des Bodens in diskreter Form berücksichtigt werden, wobei die effektive Leitfähigkeit als harmonisches Mittel zwischen zwei Schichten gebildet wird. Die Zuflüsse werden anhand des hydraulischen Potentialkonzepts von der Leitfähigkeit, vom Gefälle und von der vertikalen Bodenfeuchteverteilung der einzelnen Schichten beschrieben.

Zur Initialisierung der Simulation sind die Festlegung einer Anfangsfeuchteverteilung und die vorliegenden Bodenwassercharakteristika einschließlich der korrespondierenden Leitfähigkeiten erforderlich (Anfangsbedingungen), um im Modell die Berechnung der intern gekoppelten Wasserbewegungsabläufe und Speicheränderungen zu aktivieren. Insbesondere sind hierbei flächendeckend die Daten zur Speicherfüllung im Grid-Format einzulesen, die gegebenenfalls auch als Datensatz aus einem zuvor gelaufenen und daraufhin abgespeicherten Szenario aufgerufen werden können.

Die Größen Matrixpotential ψ , gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s und Wassergehalt bei Sättigung Θ_s sind meßtechnisch nur mit großem Aufwand bestimmbar. Um die sich daraus ergebenden Einschränkungen in der Anwendbarkeit des Modells zu vermeiden, wird auf ein Schätzverfahren zurückgegriffen. Die Beziehungen zwischen Modellparametern und Basisdaten werden üblicherweise mit Pedotransferfunktionen parametrisiert. Eine Untersuchung von HENNINGS & MÜLLER (1997) zur Bewertung von Pedotransferfunktionen macht deutlich, daß beträchtliche Unterschiede hinsichtlich der Güte des Vorhersageergebnisses beobachtet werden, wobei der Ansatz von VAN GENUCHTEN (1980) zu akzeptablen Schätzungen führt. Im Modell wird dieser verbreitet verwendete Ansatz zur Bestimmung der Saugspannungs-Wassergehalts-Funktion sowie der Leitfähigkeits-Wassergehalts-Funktion angewendet. Die hierfür notwendigen (sog. „BROOKS-COREY“-) Parameter können anhand der Pedotransferfunktion von RAWES & BRAKENSIEK (1999) abgeschätzt werden oder alternativ mit Hilfe des Pedotransfermodells ROSETTA (SCHAAP 1999) bestimmt werden. Dieses Modell benutzt alternative Ansätze, die auf Basisdaten der Bodenmatrix zurückgreifen oder bestimmt durch entsprechende pF-Kurvenanpassung die gewünschten Parameter (WESSOLEK et al. 1991; BENECKE 1992; DYCK & PESCHKE 1995; SCHAAP 1999). Im Zusammenhang mit den aufzubereitenden bodenphysikalischen Parametern wird in Kap. 6.2 zur Pedotransferfunktion fortführend Stellung genommen.

Als obere Randbedingung wird in der Modellrechnung die Infiltrationsmenge angegeben, die nach PESCHKE (1977) gemäß der Vorstellungen von GREEN & AMPT (1911) weiterentwickelt berechnet wird. Dem Ansatz liegt folgende vereinfachte Vorstellung zugrunde: Der Boden ist ungeschichtet sprich homogen. Der Matrixfluß wird gegenüber dem Makroporenfluß als dominierend angenommen und die Feuchtefront wird als sprungförmige Front annäherungsweise interpretiert. Ferner wird für das gesamte Zeitintervall die Niederschlagsintensität als konstant angenommen. Im ersten Schritt wird die Sättigungszeit berechnet, bis zu welcher der gesamte Niederschlag infiltriert. Im zweiten Schritt wird die kumulative Infiltration während der Sättigungsphase bis zum Ende des Zeitintervalls berechnet. Die nicht infiltrierte Niederschlagsmenge wird als Oberflächenabfluß definiert.

Die Dauer der Sättigungsphase bei Regen mit konstanter Intensität wird demnach im ersten Berechnungsschritt wie folgt beschrieben:

$$t_s = \frac{l_s \cdot n_a}{PI} = \frac{\frac{\psi_f}{PI / K_s - 1}}{PI} \quad (3)$$

mit

t_s	Sättigungszeit ab Beginn des Zeitintervalls [h]
l_s	Sättigungstiefe [mm]
n_a	auffüllbare Porosität ($n_a = \Theta_s - \Theta$) [-]
ψ_f	Saugspannung an der Feuchtefront ($\approx 1000 n_a$) [mm]
PI	Niederschlagsintensität [mm/h]
K_s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [mm/h]

Für die bis dahin infiltrierte Wassermenge F_s gilt:

$$F_s = l_s \cdot n_a = t_s \cdot PI \quad (4)$$

Im zweiten Berechnungsschritt wird die kumulierte Infiltration nach Erreichen der Sättigung bis zum Intervallende t wie folgt berechnet:

$$F = \frac{A}{2} + \left[\frac{A^2}{4} + AB + F_s^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

mit $A = K_s(t-t_s)$
 $B = F_s + 2 \cdot n_a \cdot \psi_f$

Die untere Randbedingung wird durch die Lage des Grundwasserspiegels (Druckrandbedingung) festgelegt. Ist der Boden gesättigt, so vereinfacht sich die RICHARDS-Gleichung und nimmt die Form des DARCY-Gesetzes an.

Noch vor der Berechnung der vertikalen und lateralen Flüsse im Boden wird der Wasserentzug aus den einzelnen Bodenschichten und aus der Vegetation ermittelt. Hierbei werden die Transpiration und die Evaporation getrennt bestimmt (vgl. Kap. 5.1). Die Transpiration der vegetationsbedeckten Flächen wird von der örtlichen Bodenfeuchte innerhalb der definierten Gridzellen in den einzelnen Schichten beeinflusst und gegenüber der potentiellen Evapotranspiration reduziert. Demnach wird die Evaporation für den unbedeckten Boden über eine bodenfeuchteabhängige Reduktionsformel berechnet. Nachdem der aktuelle Wasserentzug ermittelt ist, wird eine Neuberechnung der Bodenwassergehalte durchgeführt.

Der Bodenwassergehalt ist dann für alle Bodenschichten wie folgt zu berechnen:

$$\begin{aligned} \Theta_{m,i+1} &= \Theta_{m,i} + T_{m,i} \cdot d_m \cdot \Delta t^{-1} && \text{für } m > 1 \\ \Theta_{1,i+1} &= \Theta_{1,i} + (T_{1,i} + E_{1,i}) \cdot d_m \cdot \Delta t^{-1} && \text{für } m = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

mit	$\Theta_{m,i}$	$\Theta_{m,i+1}$	Wassergehalte vor und nach dem Aktualisieren mit den berechneten Flüssen
	i		Zeitindex
	m		Schichtindex
	Θ_m		Wassergehalt in Schicht m (i.d.R. Sättigung) [-]
	T_m		Transpirationsentnahme aus der Schicht m [mm oder m/s]
	d_m		Dicke der Schicht m [m]

5.3 Wasserentzug durch Transpiration und Evaporation

Da die aktuelle Evapotranspiration aufgrund veränderlicher Bodensaugspannungsverhältnisse im Gegensatz zur potentiellen Evapotranspiration reguliert bzw. reduziert wird, ist ihre Berechnung im Bodenmodul integriert, wobei sie dort durch Beschreibung der Bodenwasserbewegung und der Bodenfeuchte physikalisch begründet interpretiert werden kann. Im Bodenmodul wird zunächst geprüft, ob es gemäß folgender Beziehungen zu einer Reduktion der potentiellen Entnahme aus irgendeiner Schicht kommt:

$$\begin{aligned}
 ETR_i &= 0 & \Theta(\psi) < \Theta_{wp} \\
 ETR_i &= ETP_i \cdot (\Theta(\psi)_i - \Theta_{wp}) / (\Theta_{\psi_g} - \Theta_{wp}) & \Theta_{wp} \leq \Theta(\psi) \leq \Theta_{\psi_g} \\
 ETR_i &= ETP_i & \Theta_{\psi_g} \leq \eta \cdot \Theta_{sat} \\
 ETR_i &= ETP_i \cdot (\Theta_{sat} - \Theta(\psi)_i) / (\Theta_{sat} - \eta \cdot \Theta_{sat}) & \eta \cdot \Theta_{sat} < \Theta(\psi) < \Theta_{sat}
 \end{aligned} \tag{7}$$

mit

i	Schichtnummer, aus welcher verdunstet wird
ETR	reale Verdunstung [mm]
ETP	potentielle Verdunstung nach [mm]
$\Theta(\psi)$	aktueller Bodenwassergehalt bei Saugspannung ψ [-]
ψ	aktuelle Saugspannung
η	maximaler relativer Wassergehalt vor dem Erreichen teil-anaerober Bedingungen ($\approx 0.9 \dots 0.95$)
Θ_{sat}	Sättigungswassergehalt des Bodens [-]
Θ_{ψ_g}	Bodenwassergehalt bei vorgegebener Grenz-Saugspannung ψ_g
Θ_{wp}	Wassergehalt des Bodens beim Erreichen des permanenten Welkepunktes ($\psi = 1.5$ MPa entspricht ≈ 150 m)

Findet Wasserentzug durch das Wurzelsystem statt, ist ein Entzugs-Term für die Berechnung der Transpiration erforderlich. Hierzu wird die von GURTZ (1988) entwickelte Gleichung der Entnahmedichte verteilt angewendet, welche die Wurzelverteilung mittels Einbeziehung eines Parameters ρ schätzungsweise beschreibt. Als Voraussetzung gilt hierbei, daß während der Verdunstungsberechnung in der Simulation eine Verknüpfung mit den in der Steuerdatei vorgegebenen Landnutzungskennwerten hergestellt wird, so daß jede Vegetationsart definierte Parameter für Wurzelverteilungen in der Tiefe und maximale Wurzeltiefen entsprechend der Wachstumsphasen bereithält (näheres dazu in Kap. 6.1 und Tab. 6.3) Auf diese Weise kann zunächst die Entnahmedichte $d_{r,m}$ für die Schichtmitten aller voll durchwurzelten Bodenschichten ($1 \dots m$) beschrieben werden:

$$d_r(z) = d_{norm} \left(1 - \frac{z}{z_w} \right) \cdot \left(1 + \frac{z}{z_w} \cdot \rho \right) \tag{8}$$

mit

d_r	Wurzelverteilung in der Tiefe z
z	Tiefe unter der Bodenoberfläche [m]
z_w	maximale Wurzeltiefe (für jede Vegetation und jeden Zeitpunkt spezifisch)
ρ	Parameter der Wurzelverteilung ($\rho > -1$)
	für $-1 < \rho < 0$ konkave Form mit betonter oberflächennaher Entnahme
	für $\rho = 0$ lineare Abnahme mit der Tiefe

für $\rho > 0$ konvexe Form der Entnahmedichtevertelung, die zu verstärkter Entnahme aus den unteren Schichten führt

d_{norm} Normierungsfunktion, welche die diskreten Summen der Entnahmedichten aus den einzelnen Schichten auf 1 abgleicht

Diese Berechnung erfolgt sukzessive Bodenschicht für Bodenschicht, von oben nach unten bis zur untersten maximalen Wurzeltiefe. Sollten die Wurzeln nicht bis zur untersten Schichtgrenze reichen, werden gegebenenfalls zwischen oberer Schichtgrenze und maximaler Wurzeltiefe z_w Mittelwerte bestimmt.

Zusätzlich bietet das Modell WaSiM-ETH noch die Möglichkeit die Wasserentzugsberechnung zu verfeinern, welches in der Modelldokumentation SCHULLA & JASPER (1999) an speziellen Fällen detailliert diskutiert wird. Für die vorliegende Modellkonfiguration ist es an dieser Stelle ausreichend darauf hinzuweisen, daß mit Hilfe eines zusätzlich eingegebenen Reduktionsfaktors (x) für die Entnahmedichte aus der Schicht m und einem zusätzlichen Faktor (λ), der den Wasserentzugseinzugsbereich erweitert (Schichtenvergrößerung oder Grenzwert zur Reduktion), die Entnahmedichte für die Schichten $m + 1$ im Modell korrigiert werden kann (SCHULLA & JASPER 1999). Ist nach Durchlauf einer korrigierten Entnahmedichteprozedur Restwasser geblieben, kann dieses für die Evaporation aus der obersten Bodenschicht zur Verfügung gestellt werden und es gilt dann:

$$E_{z,m} = ((1 - x) \cdot d_{r,m} - (1 + \lambda) \cdot d_{r,m+1}) \cdot ETP \cdot v \quad (9)$$

mit

$E_{z,m}$ zusätzlich für die Evaporation verfügbares Wasser aus Schicht m [mm]

v Vegetationsbedeckungsgrad, pflanzenspezifischer Jahresgang [-]

ETP potentielle Verdunstung [mm]

x, λ Reduktionsfaktoren

Die Transpirationen, die daraufhin tatsächlich aus den einzelnen Bodenschichten entzogen werden, ergeben sich schließlich aus dem bedeckten Vegetationsflächenanteil und den gegebenenfalls reduzierten oder erweiterten Entnahmedichteanteilen:

$$T_m = \hat{d}_{r,m} \cdot ETP \cdot v \quad (10)$$

mit

T_m Transpirationsentnahme aus der Schicht m [mm oder m/s]

$\hat{d}_{r,m}$ korrigierte Entnahmedichte nach Gleichungen

ETP potentielle Verdunstung [mm oder m/s]

v Vegetationsbedeckungsgrad [-]

Bei der Kalkulation des Wasserentzugs durch die Evaporation ist die Berechnung nur auf die oberste Bodenschicht beschränkt. Hiernach wird die Evaporation wie folgt beschrieben:

$$E = \left[(1 - v) \cdot ETP + v \cdot E_z \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{\Theta_s - \Theta_1}{\Theta_1} \right)^2 \right] \quad (11)$$

mit

E Evaporation aus der obersten Bodenschicht [mm]

ETP	potentielle Verdunstung (nach Abzug der Interzeptionsverdunstung)
v	Vegetationsbedeckungsgrad, pflanzenspezifischer Jahresgang [-]
E_z	Summe der nicht kompensierbaren Reduktionen nach Gleichung (9)
$\Theta_{s,1}$	Sättigungswassergehalt der obersten Bodenschicht [-]
Θ_1	aktueller Wassergehalt der obersten Bodenschicht [-]

5.4 Berücksichtigung von Bewässerungsgaben

Die WaSiM-ETH Modellversion 5.0 ist in der Lage, Bewässerungsgaben oder Wasserabgaben über Drainagesysteme zu berücksichtigen. Zur Aktivierung des Bewässerungsmoduls ist jedoch eine indirekte Koppelung an das Grundwassermodul unumgänglich, welches nur in Verbindung mit dem Abflußrouting und dem Bodenmodul nach RICHARDS zulässig ist. Zur Berechnung werden daher notwendigerweise neben den Standardgrids (vgl. Kap. 4) zusätzliche Grids für das Grundwassermodul eingelesen (Schätzwerte). Bei der Modellierung können die Bewässerungsgaben über zwei unterschiedliche Ansätze einbezogen werden. Einerseits besteht die Möglichkeit, an Hand eines fest vorgegebenen Zeit-Mengen-Plans Bewässerungsgaben tabellarisch anzugeben, welches auch im vorliegenden Szenario angewendet wurde, andererseits werden die Bewässerungsmengen nach Bedarf modelliert, in dem die Intervallgaben in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (Steuerung nach optimaler Saugspannung) pflanzenspezifisch gesteuert werden. In der Modellierung wird die Bewässerungsmenge zum Niederschlag addiert. Ein einzulesendes Bewässerungsgrid bildet die Berechnungsvoraussetzung beider Modellvarianten. Dieses Grid lokalisiert die zu bewässernden Flächen und identifiziert sie anhand definierter Landnutzungscodes. Während der Simulation wird eine Verbindung zwischen der Bewässerungs-, der Landnutzungs- und der Bodentabelle in der Steuerdatei aufgebaut, so daß die unterschiedlichen Informationen, wie z.B phänologische Daten mit in die Prozeßberechnung einfließen können. Als weitere Option bietet das Bewässerungsmodul die Möglichkeit, die Herkunft des Bewässerungswassers klar aufzuzeigen (Grundwasser oder Oberflächenwasser). Dabei werden in jedem Fall die Wassermengen bilanziert.

Die Realisierung der Bewässerungsgaben wird durch Aufteilung in den folgenden 24 Stunden erfolgen, damit zu hohe Bewässerungsmengen ausgeglichen bzw. vermieden werden. Das zusätzlich zum Spülen des Bodens genutzte Wasser (*leaching water*) kann über einen fest definierten Saugspannungszielwert (ψ_{wet}) kalibriert werden. Ist die Saugspannung (ψ_{wet}) größer als die Feldkapazität, wird praktisch die Versickerung gestoppt, hingegen führen kleine Saugspannungswerte (ψ_{wet}) zu einem umgekehrten Effekt mittels Drainage.

6 Parameterbereitstellung für die verwendete Modellkonfiguration

Im Modellpaket WaSim-ETH können die einzelnen Module in der Steuerdatei entweder über den ersten Parameter jeden Abschnittes, dem sogenannten „Ignoranzschalter“, aktiviert (1) oder deaktiviert (0) werden. Wie in Kap. 5 diskutiert, sind für die vorgestellte Modellkonfiguration die Berechnungsabläufe der Verdunstung, des Bodenwassers und des Abflußroutings gewählt und auf diese Weise eingeschaltet. Für jede interne modulare Berechnung werden zusätzlich Parameter benötigt, die szenario-spezifisch angepaßt werden müssen. Die Tab. 6.1 zeigt eine Zusammenstellung aller verwendeten Parameter. So sind für die Berechnung der Verdunstung neun Parameter notwendig, die in der Landnutzungstabelle verwaltet werden. Im Bodenmodul werden gemäß des RICHARDS-Ansatzes zur Kalibrierung fünf Parameter eingelesen und acht Parameter legen die Ausgangssituation fest. Das Bodenmodul benötigt somit insgesamt dreizehn Parameter. Der Berechnungsabschnitt Abfluß erfordert zehn zusätzliche Parameter, die über das Hilfsmodell TANALYS hergeleitet werden können und als Routingvorschrift in die Steuerdatei eingelesen werden (vgl. Kap. 4.2.1).

Tabelle 6.1 Notwendige Parameter für die Modellkonfiguration
Table 6.1 Parameter of necessity

Model components	Parameter	Unit	Comments, Determinations
Land use table: used for evaporation-module and interception-module further for the ETR- withdrawal from the soil (each crop needs an entry in the land use table, parameter should not be calibrated)	r_c	$s \cdot m^{-1}$	Resistance: 12 month values, literature
	LAI	-	Leave area index: literature or measurement
	$v (= 1-A)$	-	Covering stage of vegetation: literature or measurement
	z_0	m	Plant height: literature or measurement
	α	-	Albedo: literature or measure
	z_w	m	Root depth: literature or measurement
	$d_{1,400} - d_{4,400}$	Jul. Day	Phenologic stages: empirically, literature or observed
	<i>additional for RICHARDS:</i>		
	ρ	-	Shape of root density-distribution in the soil, literature or measure, by guesswork
Σ 9 parameters	Ψ_g	m	Hydraulic head, threshold point when ETR against ETP will be reduced
Soil module Due to the RICHARDS-equation	k_D	h	Storage-coefficient of surface flow
	k_H	h	Storage-coefficient of interflow (if only one the storage of interflow in the channel analogue to basflow is taken in consideration then recommend $k_D = k_H$ scaling factor for baseflow)
	Q_0	mm/h	$Q_0 = k_D + k_H$
	k_B	m	Storage-coefficient of base flow (Q_0 and k_B are effective, if groundwater-module is connected)
	d_r	-	Drainage density for interflow i.e.. linear scaling factor for interflow ($d_r > 0$) indirect by fitting
Σ 5 parameters			
Soil table (for each soil type exist an entry in the soil table, this parameters should not be calibrated, but in case of large time steps exceptions are c_k and k_{rec})	RICHARDS		
	K_s	m/s	Tot. hydr. conductivity, lit. or measurement
	K_o	m/s	Unsaturated hydr. conductivity, lit. or measurement
	α	m^{-1}	VAN GENUCHTEN Parameter, literature, calculation
	n	-	VAN GENUCHTEN Parameter, literature, calculation
	k_{rec}	-	K_s -reduction $K_s(t) = K_{s,t=0} \cdot (k_{rec})^t$, t : depth
	l_v	-	Depth by guesswork
	d_z	m	Amount of soil layers, by guesswork

Model components	Parameter	Unit	Comments, Determinations
Σ 8 parameters	c_k	-	Thickness of soil layers, by guesswork Boundaries in the K_s -value relationship between 2 soil layers (compartments) for flow calculations, when large time steps a calibration parameter for fitting to the results in small time steps
Routingmodule (the channel parameters have to be given for each course sequence and for each supply)	B_h, B_v T_h M_h, M_v I L A_E k_h, k_v	m m $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ $m \cdot m^{-1}$ m km^2 h	The following parameters: river course- and riparian extension, channel depth, MANNING constant for channel and riparian, slope, river length, catchment size and storage-coefficients can be estimated indirectly by the help tool "TANALYS" which runs a topographic analysis. Entries of that parameters for each river sequence are necessary
Σ 10 parameter			

[observed or measured](#); [indirect](#), [literature](#)

TANALYS - Hilfsprogramm für das WaSim-ETH zur Erstellung topographischer Analysen

6.1 Parameter zur Abschätzung der Verdunstung

In Kap. 5.1 wurde ausgeführt, daß die potentiellen Evapotranspirationsprozesse über zwei gekoppelte Rechenschritte ermittelt werden. Die erste Berechnung beruht auf dem Ansatz der PENMAN-MONTEITH Gleichung und danach erfolgt die Berechnung durch die Verwendung einer feuchteabhängigen Reduktionsfunktion innerhalb des Bodenmodells, um die Transpiration und Evaporation getrennt zu ermitteln. Die Bodenfeuchte wird nach jedem Berechnungsdurchlauf korrigiert. Innerhalb dieser relativ komplexen Gleichungen werden einige essentielle Parameter unumgänglich eingeführt. Diese Parameter sind zumeist nicht ganz einfach zu bestimmen. Daher soll im Folgenden die notwendige Parameterermittlung gezeigt werden. Zusammengefaßt lassen sich alle erforderlichen Parameter wie folgt auflisten:

- i. Albedo α [-]
- ii. Oberflächenwiderstände „rsc“ als Monatswerte (Januar,..... Dezember) [$\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$]
- iii. Stellwerte, bezogen auf die vier wesentlichen Pflanzenwachstumsphasen (julianische Tagesnummern d_1, \dots, d_4)
- iv. Blattflächenindex LAI [$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$]
- v. Effektive Wuchshöhe z_o [m]
- vi. Vegetationsbedeckungsgrad v [-]
- vii. Wurzeltiefe z_w [m]
- viii. Ψ -Wert für Beginn der ETP-Reduktion (Saugspannung)

(Tab. 6.1 zeigt gesamte Modellparameterliste einschließlich der Verdunstungsberechnung)

Zunächst werden diejenigen Parameter betrachtet, die zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration herangezogen wurden.

Einige dieser Parameter lassen sich indirekt aus der Literatur entnehmen, wo in Verbindung mit der Strahlungsbilanz (Strahlungs-Term) Tabellen mit empirisch ermittelten Wertebereichen existieren (KRETSCHMAR 1995; DYCK & PESCHKE 1995; BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1990, WEISCHET 1979). Auf diese Weise sind die Albedowerte für die repräsentativen Leitkulturen Reis, Kartoffel und Mais zusammengetragen worden (vgl. Kap. 3.3).

Bei der Berücksichtigung des Aerodynamik-Terms wird deutlich, daß die Vegetation, bedingt durch ihren bestimmten Phänotypus, spezifische physikalische Reaktionen auslöst und somit einen starken Einfluß auf den tatsächlichen Verdunstungshergang ausübt. Um dieses zu berücksichtigen, werden in die Formel Diffusionswiderstände eingeführt, die sich in einen Bestandswiderstand (auch Stomata- oder Bulk-Oberflächenwiderstand) und einen Grenzwiderstand unterteilen lassen. Diese Widerstände lassen sich nur schwer parametrisieren.

In der Literatur werden unterschiedliche Herangehensweisen vorgeschlagen. So hat beispielsweise RIJTEMA (in: FEDDES et al. 1978) auf Grundlage des Zusammenhangs zwischen der Lichtintensität und dem Stomatawiderstand einen inneren Pflanzendachwiderstand entwickelt, da der Diffusionswiderstand vom Bedeckungsgrad des Bodens und der Wasserspannung des Wurzelraums abhängt. Außerdem wird angenommen, daß unter stabilen Verhältnissen für den Widerstand eine Funktion in Abhängigkeit der Pflanzenhöhe und der Windgeschwindigkeit abgeleitet werden kann. RIJTEMA (s. FEDDES et al. 1978) gelang es entsprechende Wertetabellen für die Teilwiderstände, des aerodynamischen Widerstandes (r_a) und des Bedeckungsgrades (r_c) aufzustellen.

Es besteht die Möglichkeit diese Berechnung der Widerstände im Modell durchzuführen, wobei als Ausgangsbedingung, neben der Eingangsvariablen Windgeschwindigkeit die

Parameter für Bestandshöhen (z_0) als Rauigkeitslänge vorzugegeben sind. Diese Parameter werden in der Steuerdatei im Abschnitt Landnutzungstabelle als Ausgangswerte (Randbedingungen) eingegeben.

Der Bestandswiderstand (r_s) regelt, als nicht direkt meßbare Größe, die Diffusion von Wasserdampf von der Vegetationsoberfläche in die turbulente Grenzschicht und kann somit auch vergleichsweise mit der Parallelschaltung aller Stomatawiderstände der einzelnen Blätter interpretiert werden, womit eine enge Beziehung zum Blattflächenindex gesehen wird (GURTZ et al. 1997). Für die Ermittlung dieses Parameters nutzt das Modell den Ansatz von GRANT (s. GURTZ et al. 1997), der bei der Berechnung des Stomatawiderstandes zwischen der Tages- und Nachtzeit unterscheidet. Hierbei wird ein Faktor umgekehrt proportional zum Blattflächenindex zur Charakterisierung der Vegetationsschicht eingebaut. Damit wird der Blattflächenindex zu einer wichtigen Steuergröße des Bestandswiderstandes genutzt. Die detaillierte Ableitung der Gleichungsbausteine wird in der Modelldokumentation SCHULLA & JASPER (1999) beschrieben. Ferner werden für unterschiedliche Kulturen Ausgangswerte bzw. Stellgrößen des minimalen Stomatawiderstandes (r_{sc}) bei voller Wasserversorgung und dichtem Bewuchs vorgeschlagen.

SCHULLA (1997) räumte ein, daß die Oberflächenwiderstände als Regelgröße in der Modellsimulation mißbraucht werden, da diese Parameter als Monatswerte wegen schwerer Bestimmbarkeit oft in weiten Grenzen variieren. Dies geschieht unter anderem, um die unterschiedlichen Ergebnisse der Verdunstungsberechnung mit zeitlich unterschiedlich aufgelösten meteorologischen Daten einander anzupassen.

Für das vorgestellte Modellszenario wurden die Oberflächenwiderstände einerseits aus der Empfehlung des Modellautors übernommen, andererseits geschätzt bzw. kalibriert. Es sollte dabei aber nicht außer acht gelassen werden, daß physiologische Regelungsprozesse der Pflanze bzw. des Bestandes (Stomataöffnungsweiten) natürlich auch über Temperatur und Sättigungsdampfdruck sowie kulturspezifische Anbaupraktiken (Kulturreihenabstand / Bedeckungsgrad) beeinflußt und geregelt werden können.

Da für diesen Term die pflanzenphänologischen Parameter wesentliche Stellglieder in der Modellanpassung sind, wurden auf der Horticulture Farm in Tamaghat Leitkulturpflanzen (*typical index plants*) angepflanzt, von denen fortlaufend Phänodatenmaterial ermittelt wurden (Eierfrucht, Chili, Kohl, Mais, Bohnen, Tomaten und Reis; s. Abb. A 6.1.2-4). Es konnten einerseits Pflanzenentwicklungsphasen mit typischer Bestandsstruktur aufgezeichnet werden. Hingegen mußten aus technischen Gründen Bestimmungen des Blattflächenindex (LAI) auf Kartoffel beschränkt werden. Die Blattflächenindexanpassung der übrigen Kulturen wie Reis und Mais geschah halb empirisch.

Von diesen Leitpflanzen wurden während des Postmonsuns (Wachstumssaison September 2000 bis Februar 2001) im wöchentlichen Intervall Bestandshöhen (z_0), Wurzeltiefen (d_r) und Bedeckungsgrade (v) aufgenommen. Die dazugehörigen vier Hauptentwicklungsphasen im jahreszeitlichem Zyklus wurden dementsprechend kalendarisch datiert (Keimung, Blattdeckung, Reifebeginn und Ernte s. A 6.1.2 und A 6.1.3). Abb. 6.1 und 6.2 zeigen den Entwicklungsverlauf und im speziellen am Beispiel von Mais den Wachstumsverlauf mit seinen Entwicklungsphasen. Weitere Beispiele und Ergebnisse finden sich im Anhang A 6.1.2 bis A 6.1.4).

Phenological development stages of the crop (growth curve)

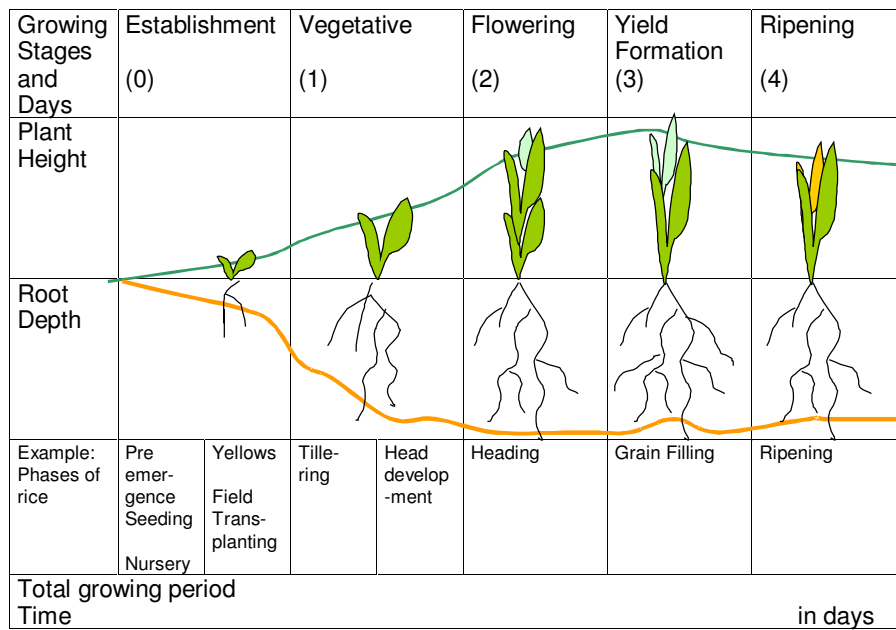


Abbildung 6.1 Die vier Hauptentwicklungsphasen unter besonderer Berücksichtigung der Reiskultur

Figure 6.1 Growing cycle represented by rice

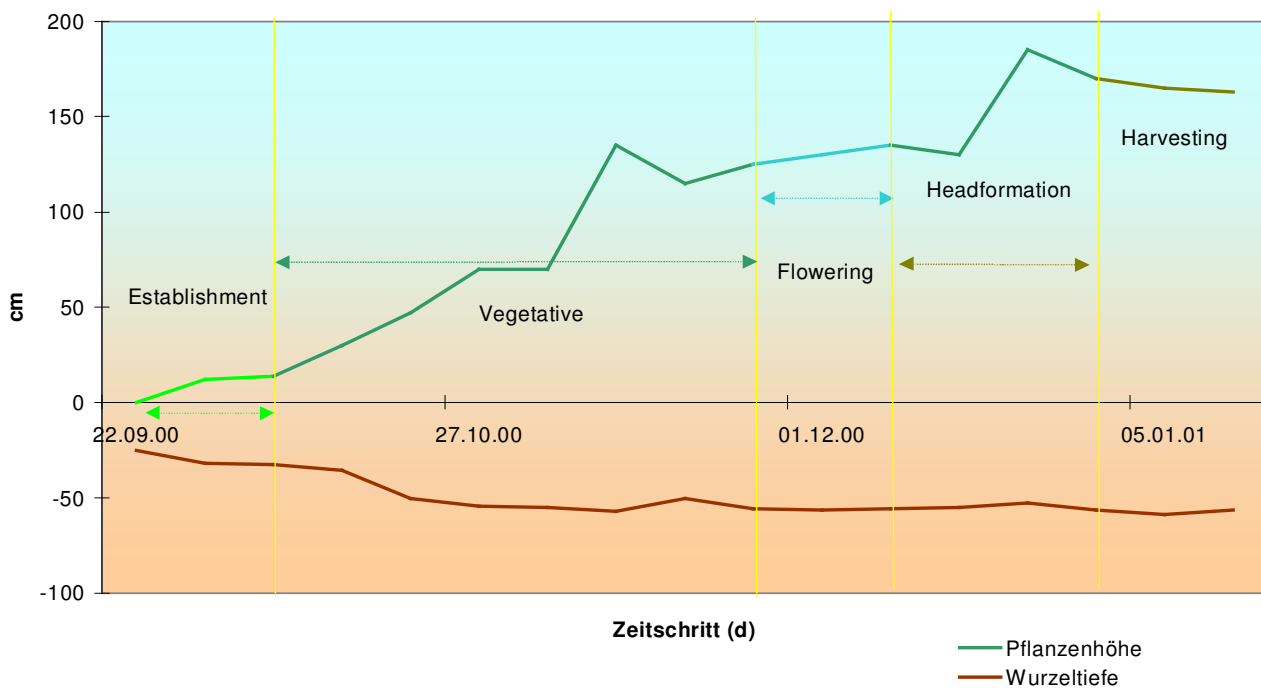


Abbildung 6.2 Wachstumsverlauf am Beispiel von Mais während der vier Hauptentwicklungsphasen

Figure 6.2 Growing cycle represented by corn

Der LAI ist als Projektion der gesamten Blattfläche eines Bestandes auf die bestockte Grundfläche zu verstehen (VAN HEEMST 1986). GEYGER (1972) recherchierte Blattflächen-Indizes für unterschiedliche Kulturpflanzen und stellte fest, daß durchaus Wertespannen innerhalb einer Kulturart von 2 bis 15 auftreten können, welche zumeist vom Nährstoffangebot und der Anbauhöhe über dem Meeresspiegel abhängig zu sein scheinen. In der Modellberechnung wird der LAI als Parameter im aerodynamischen Verdunstungsterm wie im Interzeptionsmodell genutzt. Der Blattflächenindex, der den Anteil an grünen Blättern im Verhältnis zur Bodenoberfläche charakterisiert, hilft den Entwicklungszustand und somit die Pflanzenoberfläche zu beschreiben. Er kann auf unterschiedliche Weise ermittelt werden (DAUGHTRY & HOLLINGER 1984). Im vorliegenden Fall wurde am Beispiel der Kartoffel diejenige Methode angewendet, welche die Beziehung zwischen Blattfläche und Blattgewicht einer kleinen Stichprobe Blätter auf das Gewicht der gesamten Probereinheit Blätter bzw. Pflanze bezieht und dieses dann in einen LAI konvertiert. Auf diese Weise lassen sich Pflanzen behandeln, die kleine unregelmäßige Blätter besitzen, bei denen direkte Abmessungen normalerweise mit Schwierigkeiten verbunden wären. Der Blattflächenindex ist demnach wie folgt definiert:

$$\text{LAI}_1 = (A_L/W_L) (W_{TL}/n) \quad (12)$$

mit A_L Blattfläche
 W_L Blattgewicht
 W_{TL} gesamtes Gewicht
 n Anzahl

Eine Anleitung zur schrittweisen Ermittlung des LAI ist im A 6.1.1 abgebildet. In der nachfolgenden Tab. 6.2 sind die Ergebnisse des LAI-Bestimmung für die Kartoffel aufgelistet. Die Diagramme in Abb. 6.3 zeigen die ermittelten Bestimmtheitsmaße zwischen Blattfläche und Blattrockengewicht für Kartoffeln.

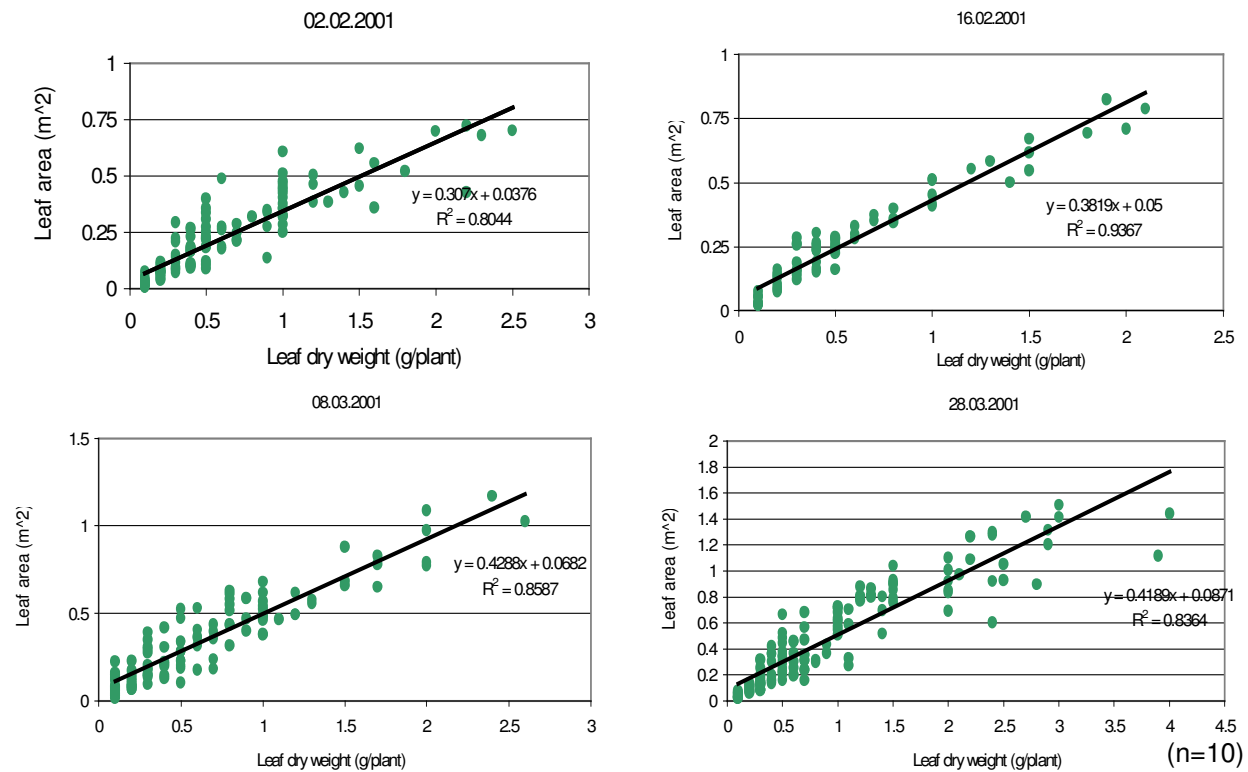
Dieses Verfahren ist jedoch äußerst zeitaufwendig, weil die einzelnen Blätter jeder Stichprobe ausgezählt und vermessen werden müssen. Eine alternative und daher weit verbreitete Methode ist, das Trockengewicht der Blätter (W_{TL}) mit einer spezifischen Blattfläche (*specific leaf area* – SLA) zu multiplizieren und anschließend das Ergebnis auf die angebaute Oberfläche (A) zu beziehen.

$$\text{LAI}_2 = W_{TL} * \text{SLA} * A \quad (13)$$

SLA-Werte für wesentliche Kulturpflanzen können bei VAN KEULEN & WOLF (1986) entnommen werden (verwendete SLA-Werte für Reis = 25, Mais = 18). Diese Methode bietet sich an, wenn keine direkten Feldmessungen für die einzelnen Kulturen vorliegen. Obgleich während der Kernphase des Projektes an Reis- und Maispflanzen Beobachtungen über Wachstumsphasen und Wuchsentwicklung vorgenommen wurden, konnten leider keine Trockengewichte oder Abmessungen von Blättern zur Verfügung gestellt werden. Von dieser Situation ausgehend erscheint es angemessen, als Ersatz für die Trockenmasseproduktion ermittelte Ernteerträge aus CEAPRED (2000) zu entnehmen. Darin werden beispielsweise vergleichbare Erntenerträge für Reis von 6 t/ha im Khet-Einzugsgebiet und für Mais 2.8 t/ha im Khet-, hingegen 1.7 – 1.96 t/ha im Bari-Einzugsgebiet ermittelt.

Tabelle 6.2
Table 6.2Ergebnisse aus der Blattflächenindexbestimmung für Kartoffel
Results of determining LAI regarding to the potato plant

POTATOS				
02.02.2001	Blattfläche	Gewicht	LAI	r ²
M	4.41E-01	1.20E+00	4.10E+00	0.8044
SD	3.49E-01	1.04E+00	1.74E+00	rx
CD	3.21E-02	2.74E-01	3.03E+00	
16.02.2001	Blattfläche	Gewicht	LAI	r ²
M	2.65E-01	5.63E-01	9.45E+00	0.9367
SD	2.00E-01	5.06E-01	2.91E+00	
CD	3.98E-02	2.56E-01	8.48E+00	
08.03.2001	Blattfläche	Gewicht	LAI	r ²
M	3.47E-01	6.50E-01	1.03E+01	0.86
SD	2.53E-01	5.47E-01	5.33E+00	
CD	6.41E-02	6.41E-02	2.84E+01	
28.03.2001	Blattfläche	Gewicht	LAI	r ²
M	4.90E-01	9.61E-01	1.05E+01	0.84
SD	3.84E-01	8.38E-01	3.93E+00	
CD	1.47E-01	7.03E-01	1.54E+01	

Abbildung 6.3
Figure 6.3Bestimmtheitsmaß R^2 für Blattfläche im Verhältnis zum Blatttrockengewicht
Leaf area per plant as a function of dry weight of leaves per potato plants in 2001

Die von CEAPRED ermittelten Ernteerträge und die auf der Horticulture Farm gemessenen Bestandshöhen wurden für eine sinnvolle Verwendung normiert. Auf diese Weise lassen sich die Werte von Trockenmassezuwachs der gemessenen Wuchshöhe gegenüber stellen. Mit diesem Verfahren konnte ein Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.9 R^2 erreicht werden (Abb. 6.4). Über diese Beziehung wird ermöglicht, LAI und Bedeckungsgrad abzuleiten (Abb. 6.5).

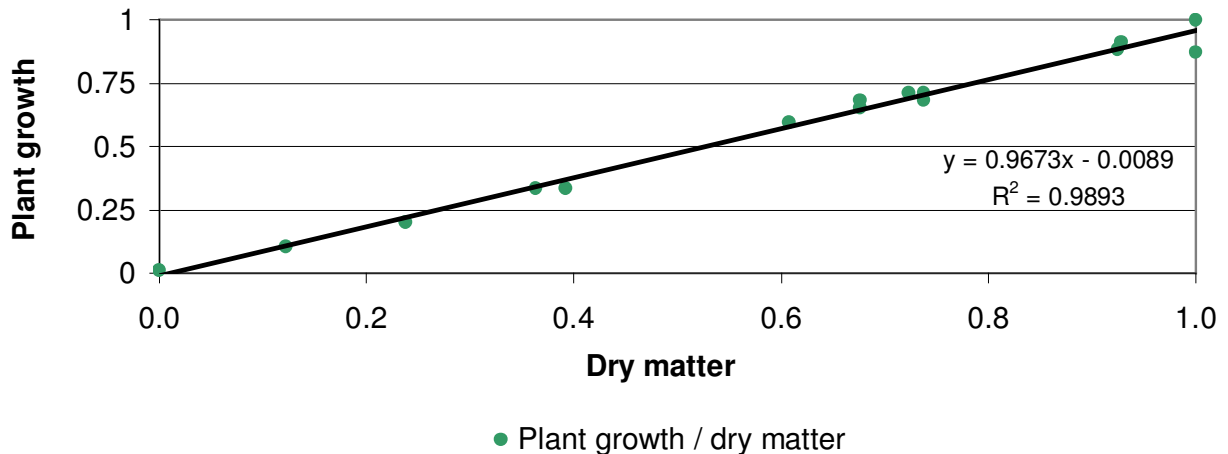


Abbildung 6.4 Beziehung zwischen normierten Werten des Pflanzenwachstums und Trockenmassezuwachses für Mais
Figure 6.4 Relation between standardised values of plant growth and dry matter for corn

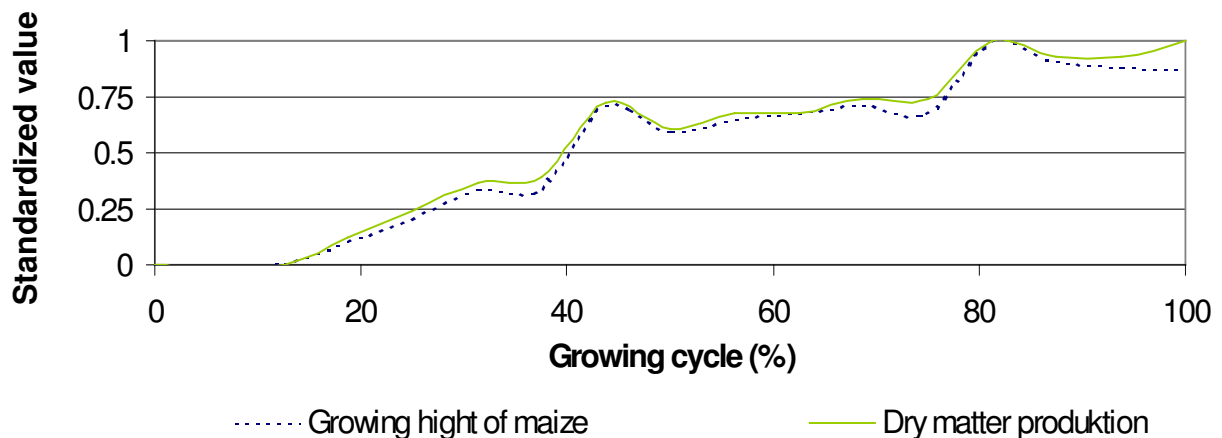


Abbildung 6.5 Anpassung des Wachstumsverlaufs an den idealisierten Zuwachs der Trockenmasseproduktion für Mais
Figure 6.5 Fitting plant growth against increase of dry matter production for maize

Es stellt sich heraus, dass bedingt durch die Normierung des Trockenmassezuwachses an den Wachstumsverlauf (in %) gute Anpassungen erreicht werden können. Ein Vergleich mit Literaturwerten bei VAN KEULEN (1986) mit Trockengewichtsanalysen an Reispflanzen im Hochland Thailands (vergleichbares Klima, 800–1000 m ü.NN) und auch an Mais zeigen, daß

die auf diese Weise ermittelten Größenordnungen der Trockenmaterialbildung vergleichbar und somit vertretbar sind.

Am Beispiel für Reis in Abb. 6.6 wird deutlich, wie sensibel jedoch die Bestimmung des LAI nach Gl. 13 auf die bezogene Fläche (kg/ha oder g/m^2) reagiert. Durch verkleinern der Bezugsfläche kann eine Vergrößerung des LAI-Wertes erreicht, welches somit in der Steuerdatei Kalibrierungen zuläßt.

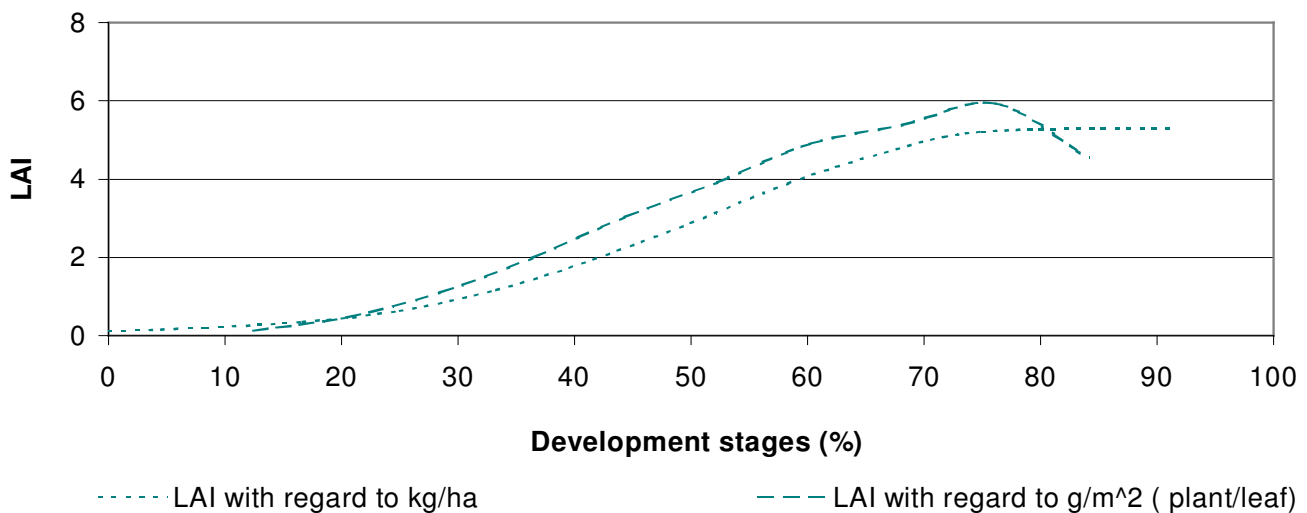


Abbildung 6.6 Gegenüberstellung der LAI Berechnung auf Basis unterschiedlicher Bezugsflächen (kg/ha oder g/m^2) für Reis
 Figure 6.6 Relation between LAI-calculation on the base of total harvest and on the base of one plant (kg/ha or g/m^2) for rice

Nun kann der zweite Berechnungsschritt zur Ermittlung der aktuellen Verdunstung vollzogen werden. Noch vor der Berechnung der vertikalen und lateralen Bodenwasserflüsse wird der Wasserverbrauch bzw. Wasserentzug aus den einzelnen Bodenschichten durch Evaporation und Transpiration getrennt behandelt (s. Kap. 5.1 und 5.3).

Über die Kombination einer Wurzeldichtevertiefungsfunktion (Gl. 8), die die Entnahmedichtevertiefung der aktuellen Verdunstung aus den Bodenschichten beschreibt (GURTZ 1988, und s. Modelldokumentation) und der RICHARDS-Gleichung, mit der die Saugspannung der Bodenschichten reduziert werden kann, gelingt es der anpassungsfähigen Pflanzenphysiologie gerecht zu werden und eine Entnahmereduktion des Wassers bis zu bestimmten Grenzwerten festzulegen. Parameter, die in diesem Zusammenhang an Bedeutung gewinnen, sind Wurzeltiefe (d_r) und Bedeckungsgrad (v). Die Saugspannungswerte (Ψ) des Bodens bestimmen den Grenzwert der nutzbaren Feldkapazität (s. Kap. 6.2). Die Wurzeltiefen sind in Feldtests ermittelt worden. Es stehen aber auch Literaturwerte zur Verfügung.

Die Bodenbedeckung beeinflusst maßgeblich die aktuelle Verdunstung nach ihrer räumlichen Variabilität. Bei zunehmend geschlossener Pflanzendecke wird die verfügbare Energie absorbiert und die Bodenverdunstung spielt eine untergeordnete Rolle, so daß die Evaporation des Bodens mit der Transpiration der Pflanzendecke gleichgesetzt werden kann.

Zur Abschätzung des Parameters Vegetationsbedeckungsgrad bietet sich folgende Funktion nach VAN HEEMST (1986) an:

$$f_h = (1 - e^{-k_e \cdot \text{LAI}}) \quad (14)$$

f_h beschreibt den Anteil der Lichtinterzeption durch Pflanzen und k_e ist der Extinktionskoeffizient (Schwankungsbereich: 0.5 ... 0.8)

Der Vegetationsbedeckungsgrad ist mit dem Anteil der Lichtinterzeption durch Pflanzen gleich zu setzen und bei dieser Annäherung von der Bestandsdichte unabhängig, da diese durch den LAI ausgedrückt wird. Der Wachstumsverlauf wird somit ideal von dieser VAN HEEMST-Formel beschrieben. Vergleicht man den auf diese Weise ermittelten Kurvenverlauf des Bedeckungsgrads mit der Realität, wird der eingeführte Extinktionsfaktor k von 0.5 notwendig, der je nach Kulturart unterschiedlich ausfallen kann (Abb. 6.7 und 6.8).

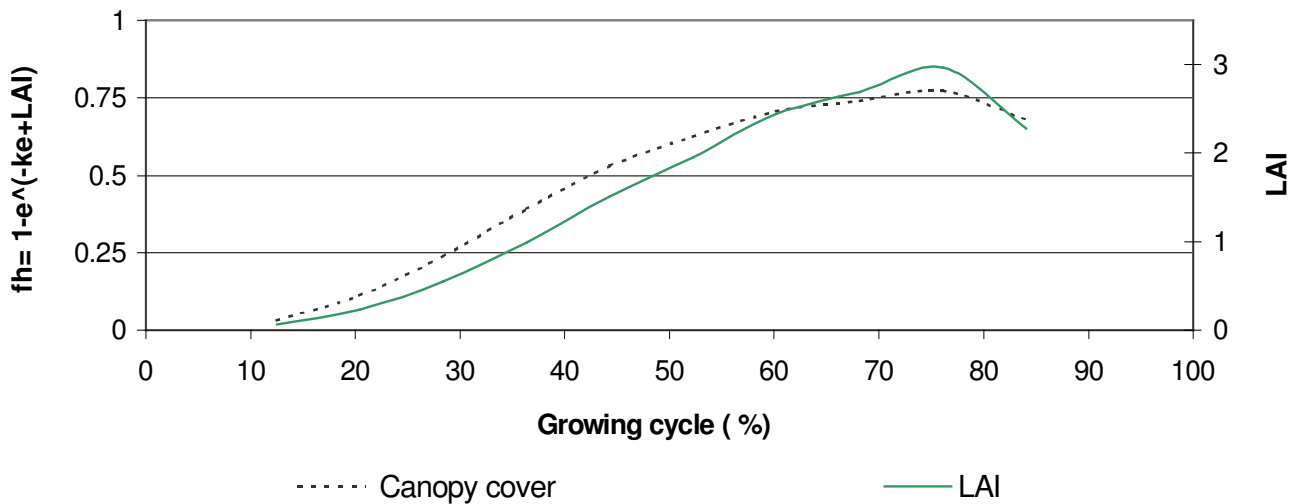


Abbildung 6.7 Verlauf des Bedeckungsgrad und des Blattflächenindex am Beispiel von Reis
Figure 6.7 Fraction of canopy cover and LAI represented by rice

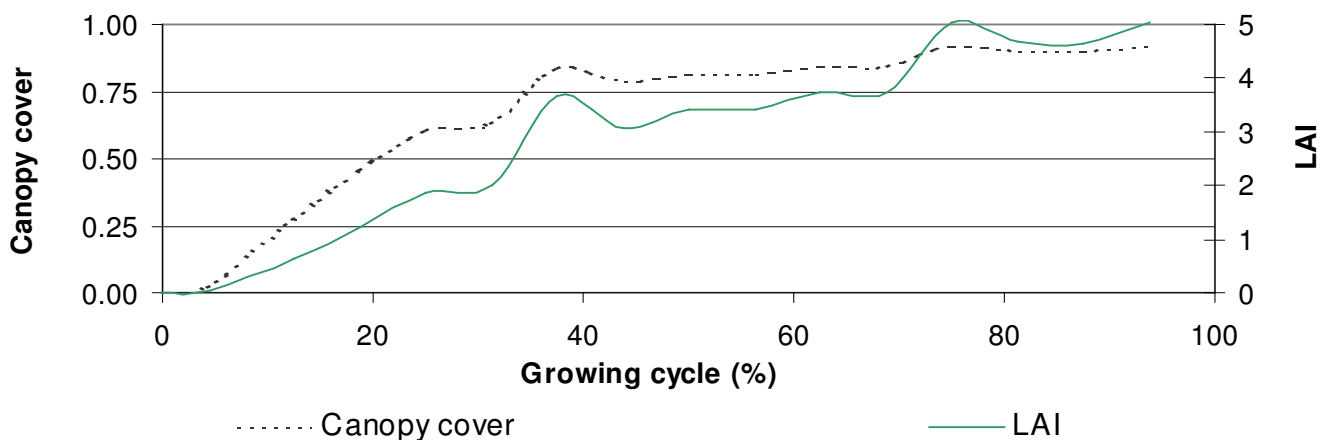


Abbildung. 6.8 Abschätzung des Bedeckungsgrades und des Blattflächenindexes an Mais
Figure 6.8 Calculation of canopy cover and LAI for maize

Alle Parameter haben einen vegetationsartspezifischen Jahresgang, welcher durch lineare Interpolation zwischen den, zu jeweils vier festgelegten Zeitpunkten, geltenden Werten berechnet wird. Diese Zeitpunkte entsprechen den Entwicklungszyklen und werden als Julianische Tage d_1 bis d_4 angegeben.

In die Steuerdatei des Modells werden schließlich die notwendigen Parameter eingegeben und teilweise in tabellarischer Form verwaltet. Die für die Verdunstung relevanten Parameter sind in der Landnutzungstabelle bereitgestellt (Zusammenstellung in Tab. 6.3). Die Art des Pflanzenbestandes in der angeführten PENMAN-MONTEITH-Gleichung wird berücksichtigt, indem die Berechnung über pflanzenspezifische Parameter gemäß der betreffenden Wachstumszeitabschnitte angepaßt wird. Die rasterbezogenen Codenummern weisen auf die jeweiligen kulturspezifischen Werte hin, die individuell ihrem Standort zugeordnete werden. Die vorangegangenen Ausführungen machen deutlich, daß eine zeitechte Parameterbestimmung für jede der lokalisierten Landnutzungstypen (s. Abb. 4.17) sehr aufwendig werden kann. Im Rahmen der Untersuchung konnte die Parameterermittlung nur auf die typischen landwirtschaftlichen Kulturen beschränkt werden (Code 6 = *agriculture*). Für die natürlichen Vegetationstypen, wie Waldgebiete, Busch- und Grasland, gibt es derzeit noch keine eigenen zeitechten Parameterermittlungen. Die Literatur hält für diesen nepalischen Klimaraum keine angemessenen Daten bereit. Das hieraus erwachsene Wissensdefizit muß entweder durch Vereinfachung des Landnutzungssystems beschrieben und codiert werden, oder es können die vorgegebenen Parameter aus der Steuerdatei des WaSiM-Modells genutzt werden, die jedoch auf andere Klimaräume abgestimmt wurden. Im vorliegenden Fall wurde beschlossen, die gesamte Fläche zu vereinheitlichen, indem jede Anbauzeit in generalisierter Codierung beschrieben wird.

Tabelle 6.3 Landnutzungstabelle mit Stellgliedern
Table 6.3 Land use table

Code	6a	6b	6c
Growing period	15.5.-12.8.00	22.9.00-12.1.01	3.1.01-28.3.01
name of the landuse type	rice	low land maize	potato
albedo	0.15	0.25	0.2
surface resistances rsc as monthly values 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50	80 80 75 75 65 65 65 65 65 75 90 90	22 22 22 22 22 75 90 90 80 80 75 75
julian day for the param.-sets	199 220 234 255	287 336 350 5	33 37 68 88
LAI 1 2 3 4	8.8 11.44 11.66 13.2	0.65 3.42 3.73 4.66	4.1 9.45 10.3 10.5
(eff. veget. height) z01 2 3 4	0.8 1.02 1.05 1.05	30 130 130 165	
Veg. covering 1 2 3 4	0.988 0.997 0.997 0.999	.0.28 0.82 0.84 0.9	0.87 0.99 0.99 0.91
root depth [m] 1 2 3 4	0.4 0.3 0.1	.14 .42 .40 .45	0.16 0.13 0.19 0.10
Param. root distribution	-0.5	-0.5	-0.5
theta-value for beginning etp-reduction	1.9	1.9	1.9

6.2 Bearbeitung bodenphysikalischer Parameter

Die für das Bodenmodul bereitgestellten Parameter werden innerhalb der Steuerdatei in der Bodentabelle verwaltet. Auch hier erhält jeder Bodentyp zur Auffindung eine eigene Codierung, so daß das Grid, welches durch Codenummern die Verteilung der Bodenarten im Einzugsgebiet markiert, während der Simulation mit den in der Steuerdatei vorgegebenen Bodenkennwerten verknüpft werden kann. Auf diese Weise können die Ausgangsbedingungen der Bodenphysik durch die definierten Zustandsvariablen festgelegt werden.

Für das Bodenmodul stehen zwei Gruppen von Parametern zur Verfügung. Die eine Gruppe umfaßt alle Kenngrößen, welche die Speicherefähigkeit des Bodens charakterisieren, wie z.B. Sättigungswassergehalt und Restwassergehalt, sowie die Saugspannung-Sättigungs-Beziehung (pF-Kurve). Die andere Gruppe kennzeichnet das Wasserleitvermögen des Bodens, welches über die gesättigte und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit beschrieben wird. Zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit bei nicht gesättigten Verhältnissen wird die Pedotransferfunktion von VAN GENUCHTEN (1980) verwendet, bei der die Parameter α und n zur Kurvenanpassung benötigt werden. Außerdem ist eine Rückgangskonstante zur Beschreibung der Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit in die Tiefe notwendig. Die Geometrie des Bodenkörpers wird über Angaben der Schichtzahl und Schichtdicke beschrieben. Zusätzlich wird noch ein interner Leseparameter für Modellsteuerungsalternativen benötigt. Ein Beispiel liefert die Tab. 6.4, in der diejenigen Bodenkennwerte gezeigt werden, die in der Steuerdatei für das Bodenmodul als erforderliche Parameter vorgegeben werden müssen und in dieser Konstellation angewendet wurden (Parametererläuterung s. Tab. 6.1).

Tabelle 6.4 Typischer Bodenkennwerte für das Khet Gebiet
Table 6.4 Soil conditions for Khet land

#Code	3	4	7	11	6
Name	Sandy loam (SL)	Silty loam (SIL)	Silty clay (SIC)	Clay loam (CL)	Khet soil (LS)
k_{sat} (m/s)	1.23E-5	1.25E-6	5.56E-8	7.22E-7	8.25E-5
Parameter 1=par 2=tab	1	1	1	1	1
θ_{sat} 1/1	0.41	0.45	0.36	0.20	0.43
θ_{wp} 1/1	0.065	0.067	0.070	0.095	0.045
α 1/m	7.5	2.0	0.5	1.9	14.5
n	1.89	1.41	1.09	1.31	2.68
Layer No. d_z [-]	31	31	31	31	31
Thickness of soil layer c_k [m]	.3333	.3333	.3333	.3333	.3333
Max. ratio k_{o_rel}/k_{u_rel}	25	25	25	25	25
k_{rec} per m k_u/k_o	0.5	0.5	0.5	0.5	.4

Zur Berechnung der Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone müssen die bodenhydraulischen Eigenschaften bekannt sein. Daher soll im Folgenden kurz auf die Ermittlung dieser wichtigsten Parameter eingegangen werden.

Um eine Vorstellung über die bodenhydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet zu bekommen, wurden neben den *in situ* Tests (vgl. Kap. 4.2.2) auch ungestörte Stechzylinderproben aus unterschiedlichen Tiefen entnommen und im Labor analysiert. Diese Proben dienten dafür, den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung (hydrostatischer Druck) zu ermitteln und durch die pF-Kurve zu beschreiben. Eine dieser Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehungen wird stellvertretend für das Khet-Land in der Abb. 6.9 präsentiert. Jeder Kurvenverlauf gibt Auskunft über den jeweiligen Bodentyp im Untersuchungsgebiet (beispielsweise deutet der stark abgeflachte Kurvenschwung zunehmenden Tonanteil in 90 cm Tiefe an). Über die pF-Werte lassen sich aus der Kurve die Spannweiten der nutzbaren Feldkapazität und Schwellenwerte des permanenten Welkepunktes definieren.

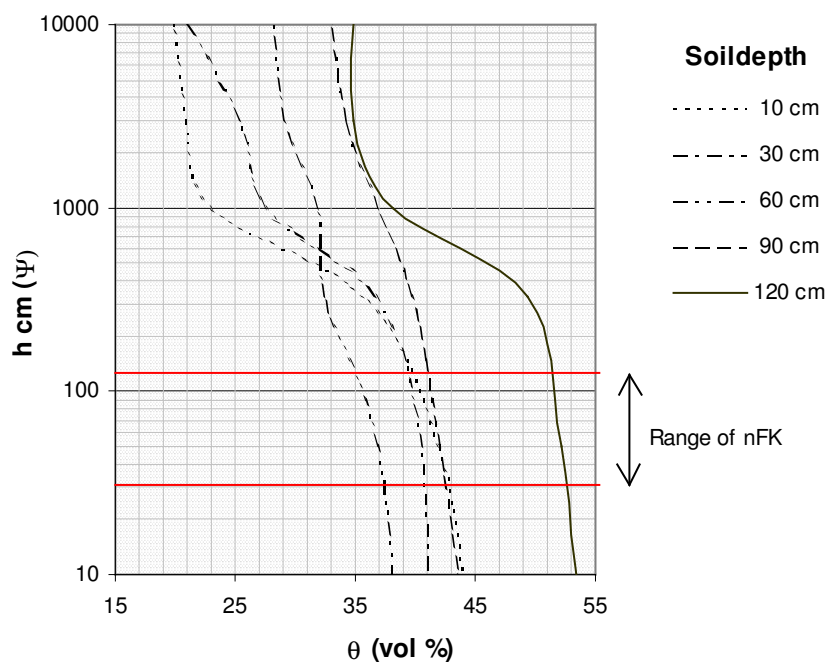


Abbildung 6.9 Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung am Beispiel eines typischen Khet-Land-Bodens

Figure 6.9 Water retention curve for a typical soil in Khet-land

Auf Grundlage der ermittelten pF-Kurven und der gesättigten Wasserleitfähigkeiten der Böden kann die stetige Funktion (Pedotransferfunktionen) nach der VAN GENUCHTEN-MUALEM Gleichung angewendet werden. Durch Ableiten dieser Gleichung besteht die Möglichkeit, einen geschlossenen analytischen Ausdruck für die relative hydraulische Leitfähigkeit k zu finden. Als Voraussetzung für die Verwendung dieser Gleichung, wird die bereits ermittelte Saugspannungskurve in eine normierte Saugspannung umgeformt, wobei der Wassergehalt in eine dimensionslose Größe im Vergleich zur Saugspannung gesetzt wird. Durch das Verfahren von VAN GENUCHTEN kann der Verlauf dieser Kurve rechnerisch durch Anpassung der Parameter α und n beschrieben werden und die Berechnung des Wassergehaltes in Abhängigkeit von der aktuellen Saugspannung erfolgen.

Anhand der Laboranalysen und unter der Einbeziehung des Pedotransfer-Schätzverfahrens nach VAN GENUCHTEN (1980) ergeben sich für die Khet-Land-Proben die Parameter-Wertebereiche in Tab. 6.5.

Tabelle 6.5 Abschätzung der VAN GENUCHTEN Parameter für Khet-Land-Bodenproben

Table 6.5 Estimation of VAN GENUCHTEN Parameters for Khet land soil types

Location	Description	Θ_{wp} [cm ³ /cm ³]	Θ_{sat} [cm ³ /cm ³]	α [1/m]	n [-]	K_s [m/s]	K_o [m/s]
Khet 1							
6	10 cm	0.0727	0.4052	0.7931	1.5318	8.70E-07	2.46E-07
7	35 cm	0.0608	0.3430	1.1307	1.3733	2.82E-07	3.58E-07
8	65 cm	0.0642	0.3434	1.1962	1.3391	2.09E-07	3.58E-07
9	95 cm	0.0690	0.3594	1.3392	1.3208	2.46E-07	3.89E-07
10	125 cm	0.0589	0.3626	1.0192	1.4634	6.53E-07	3.54E-07
Khet 2							
1	10 cm	0.0637	0.4126	0.8151	1.5601	2.01E-06	3.05E-07
2	35 cm	0.0851	0.4203	1.3196	1.3583	6.03E-07	3.55E-07
3	65 cm	0.0905	0.4431	1.3969	1.3505	8.74E-07	3.74E-07
4	95 cm	0.0954	0.4712	1.5638	1.3374	1.52E-06	4.41E-07
5	125 cm	0.0862	0.4182	1.5409	1.3075	6.31E-07	4.07E-07

In Kap. 4.2.2 wurde erwähnt, daß für die flächenhafte Beschreibung Bohrstockproben gezogen wurden, von denen die Körnung mittels Fingerproben bestimmt wurde. An etwa der Hälfte der 52 Proben wurden gemäß der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (1994) als charakteristische Bodenart, Schluffe bzw. schwach bis stark sandige Lehme definiert. Nach der USDA SOIL TAXONOMY lägen diese Bereiche etwa zwischen dem *silt loam* (SIL) und *sandy loam* (SL) (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998). Für die Ableitung geeigneter bodenphysikalischer Parameter ist der jeweilige Klassifizierungsansatz zu beachten, denn es zeigen sich immer wieder erhebliche Unterschiede zwischen der amerikanischen Systematik (USDA SOIL TAXONOMY 1971) und der deutschen Systematik (DIN 4220 oder BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1994). Aufgrund der WaSiM-Modellvorgaben im Bodenmodul, die sich an den Richtwerten von BRAKENSIEK et al. (1984) orientieren, sind Bodenklassifizierungen für pF- und K_o -Funktionen in erster Linie an amerikanische Standards angelehnt. Abb. 6.10 veranschaulicht daher das statistisch ausgewertete Kornfraktionenverhältnis der Stichproben entsprechend der USDA SOIL TAXONOMY in Verbindung mit gesättigten Wasserleitfähigkeits-Richtwerten, die aus der Empfehlung der WaSiM-ETH Modelldokumentation (SCHULLA & JASPER 1999) entnommen wurden. Auf Basis der erwähnten Fingerproben im Gelände wurden neben den empfohlenen amerikanischen Literaturrichtwerten (z.B. SCHAAP 1999; SCHULLA & JASPER 1999) auch aus deutschen Standards gesättigte Wasserleitfähigkeiten abgeleitet und gegenübergestellt (DYCK & PESCHKE 1995; AG BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1994), (s. Quelldatei Tab. A 6.2.2: Bodenart, Bodenschlüssel und Leitfähigkeit). Es ist jedoch grundsätzlich zu bedenken, daß es sich bei der Verwendung dieser Richtwerte nur um mögliche, mittlere Spannweiten handeln kann. Dieses verdeutlicht beispielhaft Abb. 6.11. Darin sind Erfahrungswerte zusammengetragen, die sich auf verschiedene Auswertungen nationaler und internationaler Literatur berufen (DYCK & PESCHKE 1995).

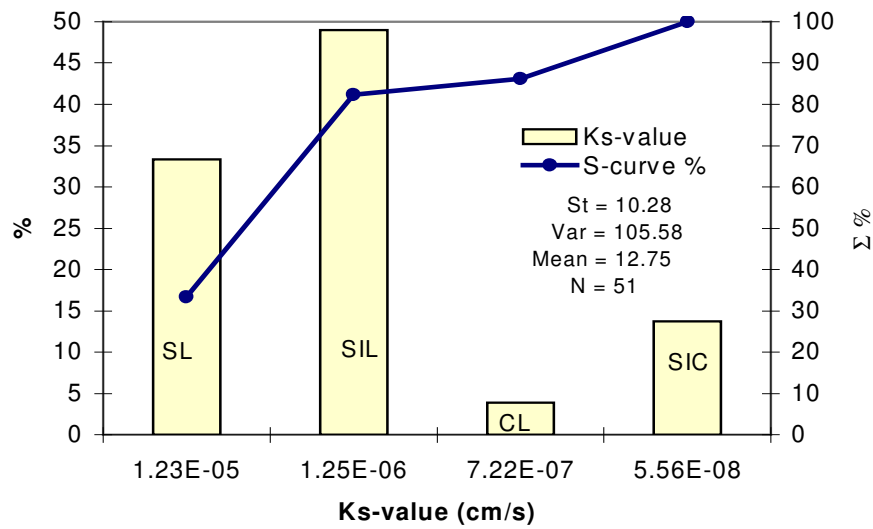


Abbildung 6.10 Häufigkeitsverteilung und Summenkurve der K_s -Werte für Khet-Land-Böden. Mittlere Richtwerte nach dem WaSiM-ETH Modell
 Figure 6.10 Frequency distribution of soil distribution and mass curve of K_s -values

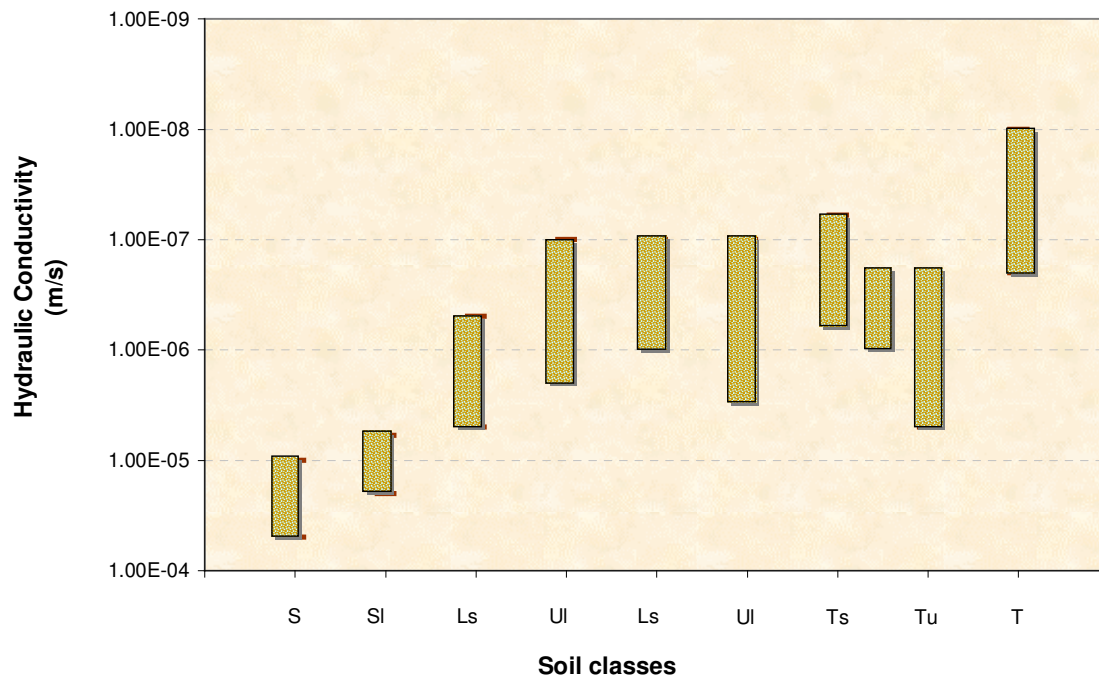


Abbildung 6.11 Bereiche für den Durchlässigkeitsbeiwert (k) wichtiger Bodenarten (nach DYCK & PESCHKE 1995)
 Figure 6.11 Range of hydraulic conductivity in different relevant soil types (source DYCK & PESCHKE 1995)

Möglicherweise läßt sich die Variabilität dadurch erklären, daß sich neben unterschiedlichen Bestimmungsansätzen auch insbesondere in Agroökosystemen die Wasserflüsse im Verlauf der Vegetationsperiode bearbeitungs-, witterungs- oder wachstumsbedingt (Wurzelverdichtung) ändern können, welches oftmals zu Fehlern bei deren Simulation führen kann (BORK 1992). Letztlich macht es allerdings keinen großen Unterschied, welcher Klassifizierungsansatz verwendet wird, da die Durchlässigkeitsbeiwerte für die vorkommenden Bodenarten generell als gering bis sehr gering einzustufen sind.

Um die Glaubwürdigkeit dieser indirekt bestimmten Richtwerte zu prüfen, wurden die aus der Körnung abgeleiteten K_s -Werte (vgl. Histogramm in Abb. 6.10) mit den im Labor ermittelten Ergebnissen verglichen (s. K_s -Werte Tab. 6.5). Da zeigt sich, daß die Werte der ungestörten Laborbodenproben sich in ähnlicher Größenordnung bewegen, d.h. sich auch durch mäßige Durchlässigkeit auszeichnen, wie die im Feld bestimmten SIL-Böden. Aus logistischen Gründen konnten nur an vier Standorten aus unterschiedlichen Tiefen Stechzylinderproben mit einem Volumen von 100 cm³ entnommen werden, wobei dabei davon ausgegangen wurde, daß repräsentative Horizonte getroffen wurden. Für den Khet-Boden sind hauptsächlich Bodenart aus den Bereichen Lt und Ls ermittelt worden, dagegen tendieren die Bari-Böden mehr zu den SI-Böden. Abb. 6.12 zeigt die mittlere Streuung der Bodentypen, wobei für die Khet-Böden eine Konzentration im Ls- Bereich (bzw. *loam*) zu beobachten ist.

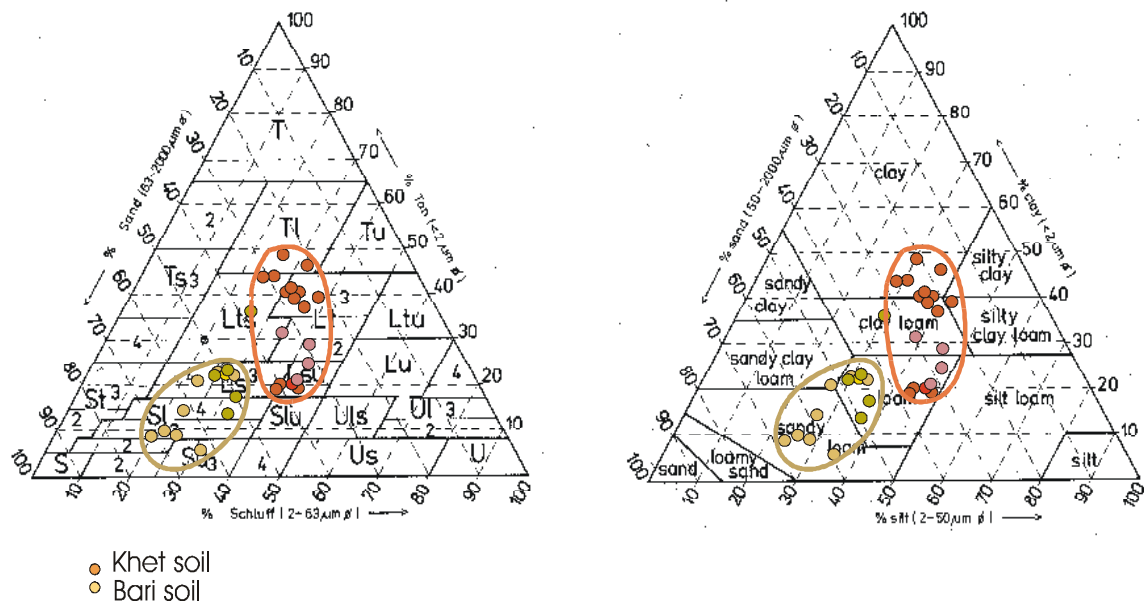


Abbildung 6.12 Klassifizierungsansätze für Bodenarten des Feinbodens im Vergleich: mit Ergebnissen nach DIN 4220 (links) und der USDA Soil Taxonomy (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992) (rechts)

Figure 6.12 Comparison between soil type classification on the base of the texture triangle system DIN 4220 (left) and USDA Soil Taxonomy (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992) (right)

Detaillierten Einblicke in weitere Bodenanalysen bieten zusätzlich die Quelltabellen und Diagramme im Anhang A 6.2 über Bodenansprachen, Körnungsanalysen, Rohdichten, Wasserspannung u. Wassergehalte, Infiltration etc..

Außerdem wurden der Verständlichkeit halber im Untersuchungsgebiet Infiltrationstest (Doppelring-Methode) durchgeführt. Ihre Ergebnisse waren speziell dafür vorgesehen, die indirekt bestimmten K_s -Werte zu verifizieren. Die Testergebnisse ergaben Infiltrationskurven, die zum Teil sehr denen von „*clay loam*“ ähneln (nach KOSTIAKOV & LEWIS in: FAO 1989), welche mit den Laboranalysen zur Bestimmung der Kornfraktionen übereinstimmen (s. Anhang A 6.2.8 + A 6.2.9). Generell erwiesen sich die Infiltrationstests als sehr zeitaufwendig. Sie zeigten außerdem große Unstetigkeiten im abfallenden Ast der Infiltrationskurve, die sehr wahrscheinlich durch bevorzugte Fließwege in den Makroporen ausgelöst wurden. Bedenkt man nun, daß in diesem Zusammenhang BORK (1992) Labor- und Geländeuntersuchungen verglichen hat und zu dem Ergebnis kam, daß die mittleren Feld pF-Kurven meist erheblich niedriger ausfallen, als die im Labor ermittelten Desorptionskurven, sollte man die ermittelten Felddaten nicht direkt, sondern nur als Anhaltswerte benutzen.

Ob nun nach Feldtests oder nach den –durch die begleitenden Umstände nur wenigen– entnommenen Stechzylinderproben vorgegangen wird, nach der USDA SOIL TAXONOMY sind die dominierenden Bodentypen hauptsächlich im Bereich des *silt loam* (SIL) und *sandy loam* (SL) angesiedelt. Häufig wird die Meinung vertreten, daß die Aussagekraft von Laborwerten gering ist, wenn diese anschließend als repräsentative Werte für größere Feldbereiche genutzt werden sollen (DYCK & PESCHKE 1995; TIETJE et al. 1993; BORK 1992). Daher erscheint es angemessen vorwiegend aus der Literatur die Zustandsvariablen (Bodenkennwerte) der Gruppen (SIL) und (SL) zu verwenden, die als Modellbasis im Bodengrid eingelesen werden. In der Steuerdatei erlaubt die Bodenparametertabelle (Tab. 6.3) jedoch jede der unterschiedlich ermittelten Bodenparameter anzuwenden und auf ihre charakteristische Signatur im Einzugsgebiet zu testen.

Nachdem die Bodenkennwerte auf diese Weise flächendeckend definiert wurden, konnten sie einer räumlichen Strukturanalyse unterzogen und durch das Bodengrid (Abb. 6.13) annähernd repräsentativ regionalisiert werden, wie es in Kap. 4.2.2 beschrieben wurde.

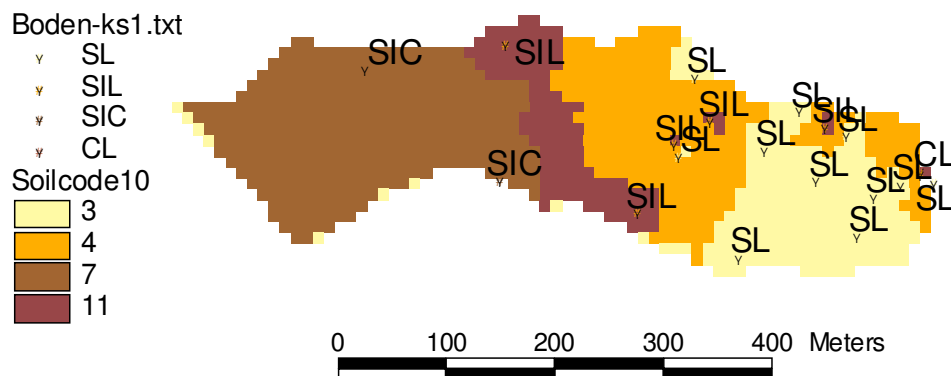


Abbildung 6.13 Bodentypen auf Basis der räumlichen Strukturanalyse am Beispiel des Khet-Land-Einzugsgebiets auf 10m Grid aggregiert

Figure 6.13 Soil types based on the spatial structure analysis in the Khet-land catchment for 10m grid size

7 Modellanwendung

Während des Preprozessings taten sich neue Erkenntnisse über die wesentlichen Gebietsmerkmale im Untersuchungsgebiet auf. Dieses veranlaßte die in Kap. 1.3 aufgestellte Hypothese zu überdenken. Die Auswertungen der Daten für die Modellanwendungen zeigten, daß das Khet-Gebiet ein offenes hydrologisches System besitzt, was durch das kartierte Bewässerungsnetz bestätigt wurde (vgl. Kap. 4.1 Abb. 4.3). Die komplexe Struktur der Fließwege wird durch künstlich angelegte Bewässerungskanäle stark verändert und beeinflusst nachhaltig das hydrologische System. Nicht nur der externe Zulauf, auch Entnahmen durch verschiedene Ableitungen verändern massiv die Verweilzeit und den Verbleib des Wassers. Das führte schließlich dazu, die geplante Modellkonfiguration für die bewässerten Monatsabschnitte im Khet-Gebiet etwas zu modifizieren (vgl. Simulationsstrategie „genügsamer Ansatz“ Kap. 2.4), denn die verzögerten Abflußreaktionen, die das Bewässerungsnetz mit seinen Zu- und Ableitungen über die Terrassen verursacht und ein kompliziertes Abflußsystem gestaltet, können in diesem Fall nur durch einen komplexeren Modellaufbau erfaßt werden. Das wurde durch Zuschaltung der Bewässerungs-, Grundwasser- und Routing-Module erreicht.

Zur Modellierung des Fließverhaltens im Einzugsgebiet sind zwei Modellkomponenten, das Verdunstungsmodul nach der PENMAN-MONTEITH-Gleichung (Kap. 5.1) und das Bodenmodul für die ungesättigte Zone nach dem RICHARDS-Ansatz (Kap. 5.2) maßgeblich.

Einzelne Bewässerungsgaben werden über das Bewässerungsmodul nachvollzogen, wobei dieses Modul nur aktiviert werden kann, wenn Grundwasser- und Routing-Module parallel zugeschaltet mitlaufen. Dieses ist erwähnenswert, da für den unmittelbaren Anwendungsfall eigentlich der Grundwasserkörper aufgrund seiner Lage außer acht gelassen werden sollte (vgl. Kap. 3.1) aber nun als fiktive Grenzbedingung angenommen werden muß. Ebenso läßt sich die Routingvorschrift nicht umgehen, da nur mit ihr externe Zu- und Abflüsse berücksichtigt werden können.

Zusammengenommen greifen schließlich diese fünf aktivierten Module auf insgesamt 19 abgespeicherte Grids zurück (1 *DHM*-Grid, Zonengrid, 3 Landnutzungsgrid, 4 Bodentypengrid, 5 Fließzeitengrid, 6+7 Neigungs- und Expositionsgrid, 8 Bewässerungscodegrid, 9 max. Überstaugrid, 10–12 Flußbettbreite-, -tiefe- und -nummerngrid, 13–15 Speicherkoeffizientengrids, Grids für hydr. obere- und unterer Druckrandlagen, 16 Äquifermächtigkeitgrid, 17 Kolmationsgrid, 18+19 K_F -Grids für x- und y-Richtung). Neben den tabellarisch einzulesenden Ausgangs- und Rahmenbedingungen sind darüber hinaus die in Kap. 6 beschriebenen fünf Bodenparameter und die neun verdunstungsregelnden Parameter anzupassen (vgl. Kap. 4 und Kap. 6). Die Tab. 7.5 vermittelt im Anschluß eine Übersicht der wichtigsten Fakten zur angewendeten Modellkonfiguration.

7.1 Interpretation der Abflußganglinien

Die Zeitabschnitte für das Modellszenario des Khet-Gebietes erstrecken sich über den Monsunbeginn 2000 bis zum Anfang des Vormonsuns 2001. Da während dieser Zeit unterschiedliche Kulturen angebaut wurden, ist aus modelltechnischen Anpassungsgründen der Beobachtungszeitraum in drei Abschnitte unterteilt worden. Der erste Zeitabschnitt beschreibt die Anbausaison der Reiskultur vom 15.05.2000-12.08.2000, der zweite eine Maiskultur ab 22.09.2000-12.01.2001. Anschließend wird der Kartoffelanbau während des Zeitabschnitts vom 03.01.2001-04.04.2001 gezeigt.

Für die flächenhafte Auflösung wird ein 10 m Grid verwendet, das ausreichende Geländeinformationen bietet. Der externe Kanalzulauf übt den stärksten Einfluß auf das Abflußgeschehen und somit auf das gesamte Modellergebnis aus. Daher bestimmen seine manuell aufgenommenen Meßwerte den zeitlichen Modellmaßstab (vorgegebene Zeitdiskretisierung). Bei der Erfassung dieses externen Zulaufs im Khet-Gebiet können Unsicherheiten auftreten (Kap. 4.1), so kommt für die zeitliche Auflösung nur ein 24 Stunden Input-Intervall in Betracht. Auf diese Weise wird erreicht, den externen Zufluß annähernd geglättet wieder zu geben.

Für die Modellszenarien wurden verschiedene Ausgangssituation im Untergrund getestet. Dabei sind alternative Bodengrids und Reaktionen verschiedener Leitfähigkeitsspannweiten im Grundwasserkörper auf das System getestet und in einen hydraulischen Gleichgewichtszustand eingeschwungen worden. Die beste Anpassung wird mit dem in fünf Einheiten untergliederten Teileinzugsgebiet (s. Abb. 7.1, Zonengrid TG5) erreicht (vgl. Kap. 4.2.1 Abb. 4.15e; Ableitung durch topographische Analyse/TANALYS).

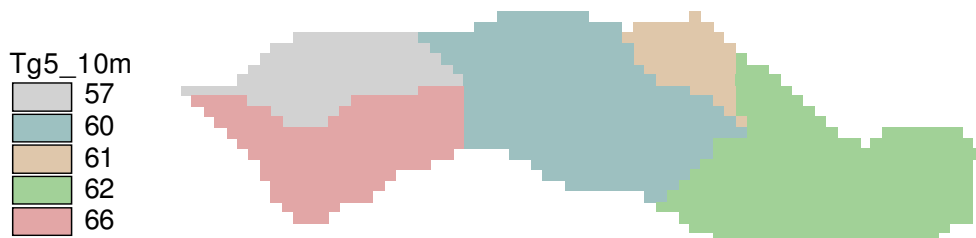


Abbildung 7.1 Zerlegung in Teileinzugsgebiete für die Berechnung des Abflußroutings
Figure 7.1 Catchment dissection for using the routing procedure

Für die Kalkulation von Bewässerungsgaben wird auf ein Bewässerungsgrid zurückgegriffen, welches die zu bewässernden Flächen lokalisiert. Die Abb. 7.2 zeigt den zu bewässernden Flächenanteil innerhalb des Einzugsgebietes (EZG), der an Hand von Luftbildinterpretationen und einer Landnutzungskartierung im Gelände (PRASAI 2001) rekonstruiert wurde.

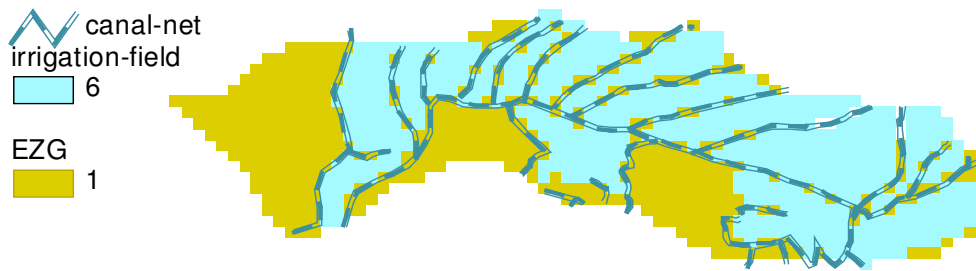


Abbildung 7.2 Stark generalisierter Flächenanteil der Bewässerungsfelder
(Bewässerungsgrid 10m)
Figure 7.2 Generalised irrigation-grid (10m)

Bedingt durch den Skalentransfer (*upscaling*) auf ein 10m Grid werden die bewässerte Fläche stark generalisiert und der tatsächliche Flächenanteil unterschätzt. Maßgeblich ist jedoch die modelltechnische Umsetzung der Kalkulation.

Die Simulation beginnt mit dem Zeitabschnitt 15.05.2000-12.08.2000. In dieser Zeit erscheint das gesamte Tal in relativ saftigem Grün. Die Terrassen werden in dieser Anbausaison für den Naßreisanbau hergerichtet. Dafür wird der Untergrund in den Becken vor dem Pflanzen verfestigt, um Wasser- und Nährstoffverluste durch Versickerung auszuschalten. Die oberste Bodenschicht wird bisweilen durch das Stampfen der Wasserbüffel und mittels einem Planierschild (*Leveller*) zu einem gleichmäßig feinen Schlamm Boden vermischt und eingeebnet. Aufgrund dieser weltweit üblichen Anbautechnik ist leicht vorstellbar, daß dadurch ein natürliches Abfluß- und Infiltrationsverhalten stark beeinflusst wird. Fast alle Niederschläge werden unmittelbar in den terrassierten Becken aufgefangen. Beobachtungen der Abflußganglinie zeigen zunächst untypische Reaktionen. So bleibt eine erwartete Abflußreaktion aus, dann aber erscheinen Abflußspitzen, die auf dem ersten Blick nicht unmittelbar mit einem Niederschlagsereignis in Zusammenhang gebracht werden können. Derartige Phänomene konnten fast in jedem untersuchten Zeitabschnitt beobachtet werden.

Zunächst ist der Versuch unternommen worden, das gesamte Gebiet anhand einer einheitlich repräsentativen Bodenfläche zu beschreiben (Abb. 7.4). Da die Bodenbeschaffenheit für den Reisanbau stark verdichtet wurde, erscheint es am plausibelsten, den Boden gemäß der Infiltrationstestergebnisse (s. Kap. 6.2 und Anhang A 6.2.8-9) als einen „clay loam“ (CL) zu charakterisieren. Diese Testlaufvariante basiert auf einem vorgegebenen K_f -Wert von E^{-7} im Grundwasserkörper (Standardvoreinstellung), wobei sich während der Modellanpassung eine fiktive Grundwasserspiegellage einstellt (s. Abb. 7.3). Bei der Standardvoreinstellung wird der Bodenspeicher für jede Diskretisierungsschicht mit einem Wassergehalt initialisiert, der dem hydraulischen Gleichgewicht entspricht. Der Grundwasserstand ist so gewählt, daß die unteren $\frac{3}{4}$ aller Diskretisierungsschichten gesättigt sind. Daher werden in den vorgestellten Szenarien Anzahl und Mächtigkeit der Bodenschichten ausschlaggebend und bei der Initialisierung wird der Grundwasserspiegel bei gegebener Schichtmächtigkeit von 0.3 m in 2.1 m Tiefe bemessen (s. Steuerdatei für Bodenkennwerte Tab. 6.3).

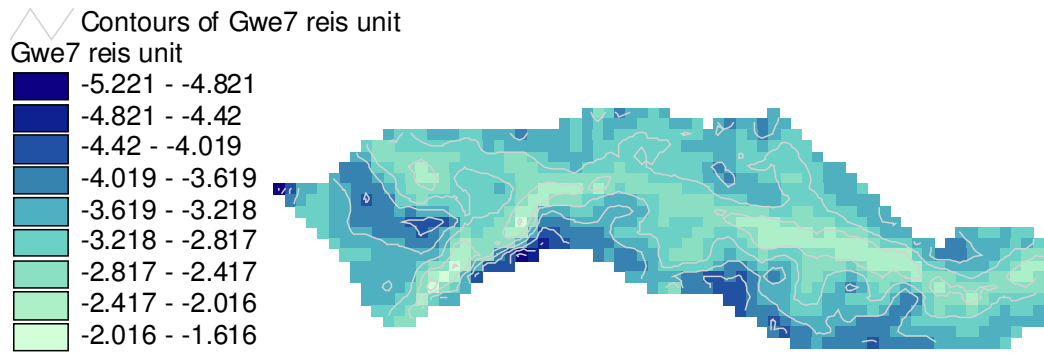


Abbildung 7.3 Grundwasserstand bei Standardvoreinstellung mit K_f -Wert E^{-7}
 Figure 7.3 Ground water table-grid by default with K_f Value E^{-7}

Die Abb. 7.4 zeigt die auf Standardvoreinstellung basierende Modellanpassung. Die grau gestrichelte Linie kennzeichnet den gemessenen, die schwarzen Linien die modellierten Abflüsse.

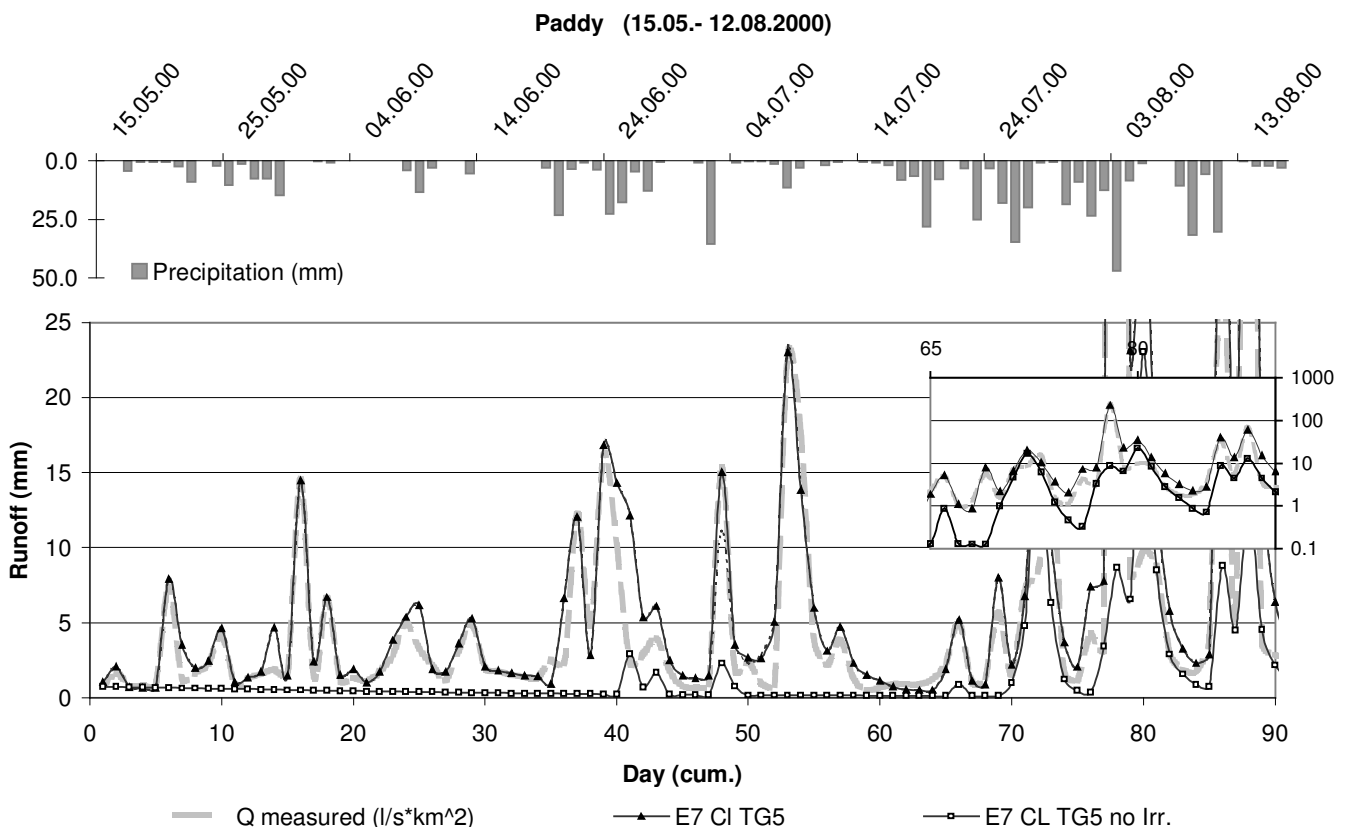


Abbildung 7.4 Abflußganglinie während der Reisanbauperiode (15.05.2000 – 12.08.2000) auf Basis eines Einheitsgrids (CL-clay loam)
 Figure 7.4 Regime curve on the base of a CL-soil grid

Innerhalb der Abb. 7.4 zeigt eine Ausschnittsvergrößerung (Maßstabsdarstellung log) die Hauptmonsunzeit, um die enormen Abflußhöhen, die am 23.7.00 ein Maximum von bis zu 240 mm erreichten, besser zu erfassen.

Ohne das zusätzliche Bewässerungsmodul innerhalb des Bodenmoduls läßt sich das tatsächliche Abflußverhalten nicht reproduzieren, welches die Gangliniendarstellung von *E7 CL TG5 no Irr* mit der Berechnung ohne Einschalten des Bewässerungsmoduls zeigt. Die meisten Abflußspitzen bleiben unberücksichtigt. Sie lassen sich nur durch zusätzliche Bewässerungsgaben erklären und auf diese Weise modelltechnisch nachvollziehen. Die modellierte Ganglinie *E7 CL TG5* konnte mit 43 Bewässerungsgaben aufrechterhalten werden, zeigt jedoch beispielsweise am 28.5.00 ohne Bewässerungseinfluß einen Abflußimpuls, der nicht abgemindert werden konnte. Eine ähnliche Situation stellt sich am 22.6.00 ein, wo es nicht gelang, den abfallenden Ast der Ganglinie früher zum Rückgang zu aktivieren. Dennoch kann eine Anpassung mit einem Bestimmtheitsmaß von $0.89 R^2$ erreicht werden.

Eine zweite Modellvariante in Abb. 7.6 basiert auf dem differenzierten, durch die Strukturanalyse idealisierten Bodengrid (vgl. Abb. 4.15 und Abb. 6.13). Für eine angemessene untere Randbedingung wird eine stabile GW-Spiegellage durch langjähriges Einschwingen (Abb. 7.5) bzw. durch wiederholtes Einlesen der Ergebnisse des vorangegangenen Testlaufs erreicht.

Bei diesem Szenario (Abb. 7.6) wird die Berechnung durch Einbeziehung der Überstaufunktion und Hinzuschalten eines zusätzlichen Überstaugrids durchgeführt. Die in diesem Grid angegebene Stauhöhe beträgt 4“ Inch (mündl. Mitteilung nepalesischer Kollegen). Danach richten sich die Bewässerungsintervalle nach der jeweiligen Aufrechterhaltung des Beckenwasserniveaus und erfolgen je nach Bedarf. Die Modellanpassung erreicht ein Bestimmtheitsmaß von $0.96 R^2$.

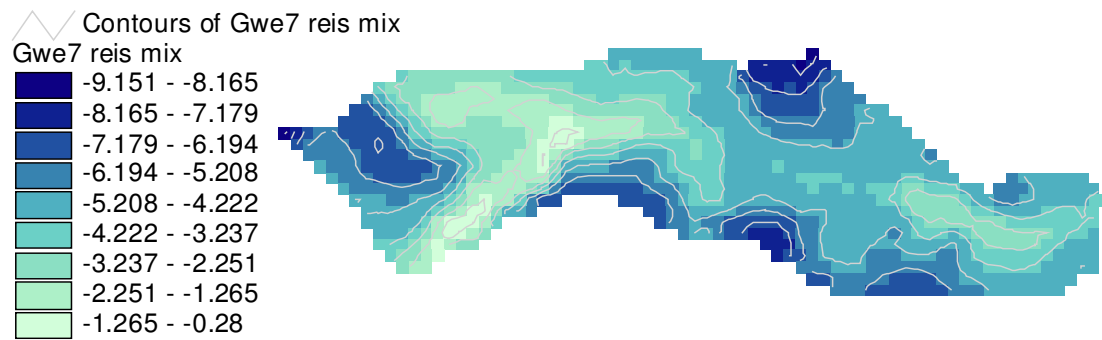


Abbildung 7.5 Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinstellung mit K_f -Wert E^{-7}

Figure 7.5 Ground water table-grid by adjusting over longtime with K_f -Value E^{-7}

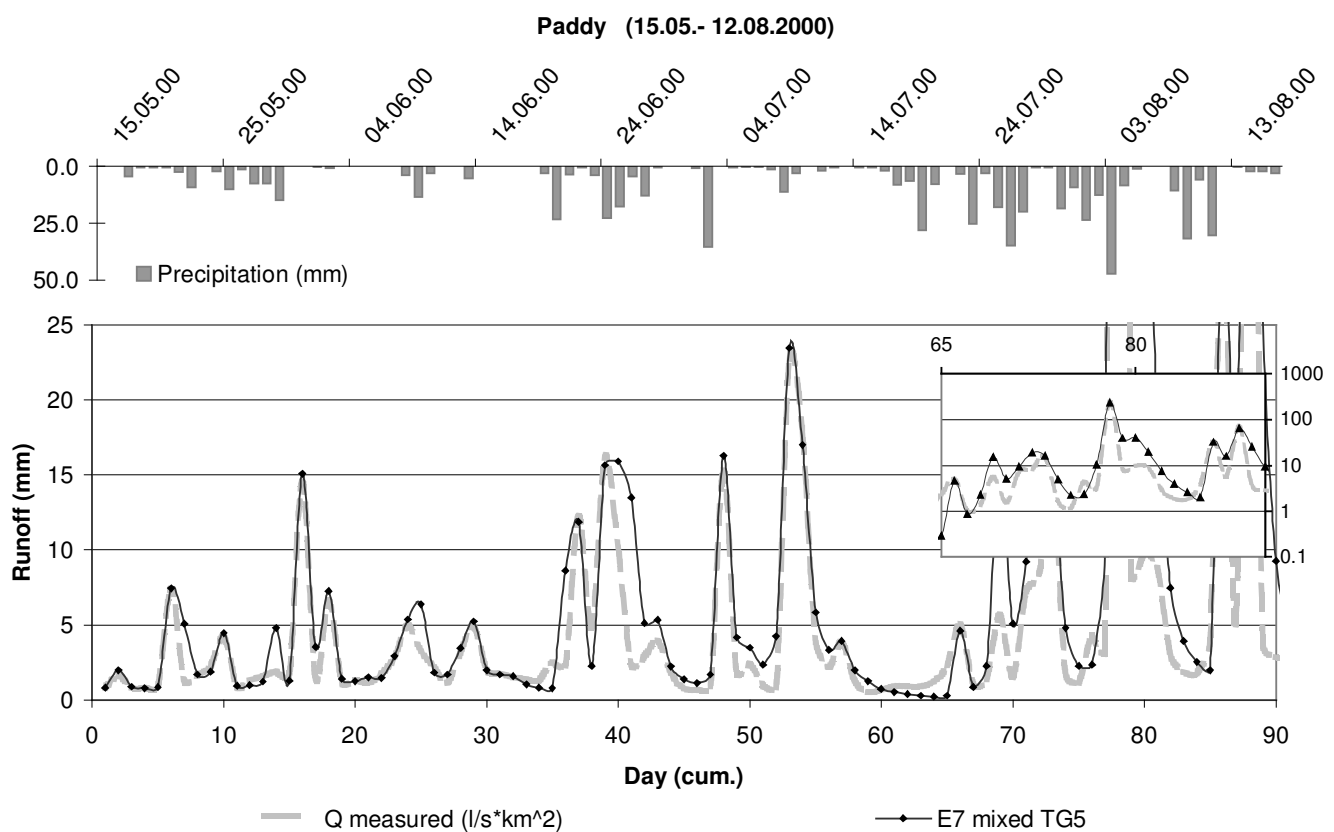


Abbildung 7.6 Abflußganglinie während der Reisanbauperiode (15.05.2000 – 12.08.2000) auf Basis eines differenzierten Bodengrids

Figure 7.6 Regime curve on the base of mixed soil type grid

In den beiden folgenden Modellszenarien wird die Anbausaison der Maiskultur vom 22.9.2000-12.01.2001 beschrieben. Der Mais wurde für diesen Zeitraum (Postmonsun) als Leitkultur gewählt, obwohl die übliche Anbauzeit von März bis Juli erfolgt (vgl. Anbaukalender Abb. 3.7), weil er speziell für Projektstudien angepflanzt wurde und kontinuierlich pflanzenphänologische Daten gesammelt und aufgezeichnet wurden (vgl. Kap. 6.1). Diese Wahl basiert aber auf zeitechten klimatischen Rahmenbedingungen hinsichtlich der beobachteten Pflanze. Der Bewässerungsbedarf richtet sich hauptsächlich nach gegebenen Witterungsverhältnissen. Mais wird in Furchen kultiviert und die Furchen werden auf bis zu 6“ Inch komplett geflutet, wobei verbleibendes Restwasser nach einigen Stunden wieder dräniert wird.

Die Simulation basiert, wie im vorangehenden Beispiel, auf einem fünfteiligen Zonengrid. Hier wurden ebenfalls die Rahmenbedingung anhand unterschiedlicher Bodengrids getestet, wobei alternative Berechnungen mit vorgegebenen K_f -Werten untersucht wurden. K_f -Werte mit der Größenordnung um E^{-6} reagierten mit iterierendem Verhalten, d.h. mit Sättigung in den niederen Bereichen und dadurch bedingt mit zu starker Exfiltration, wonach diese instabilen Testlaufvarianten verworfen werden mußten. Dagegen zeigen K_f -Werte bei E^{-7} bessere Ergebnisse, zumal diese Werte den Erkenntnissen aus den Bodenproben in tieferen Schichten entsprechen (Kap. 4.2.2, INTERIM REPORT 2001/A 3.2.1.4). Eine stabile GW-Spiegellage wird bei dem differenzierten Bodengrid durch fingiertes langjähriges Einschwingen erreicht (Abb. 7.7a), in dem durch wiederholtes Einlesen auf Ergebnisse des vorangegangenen Testlaufs zurückgegriffen wird.

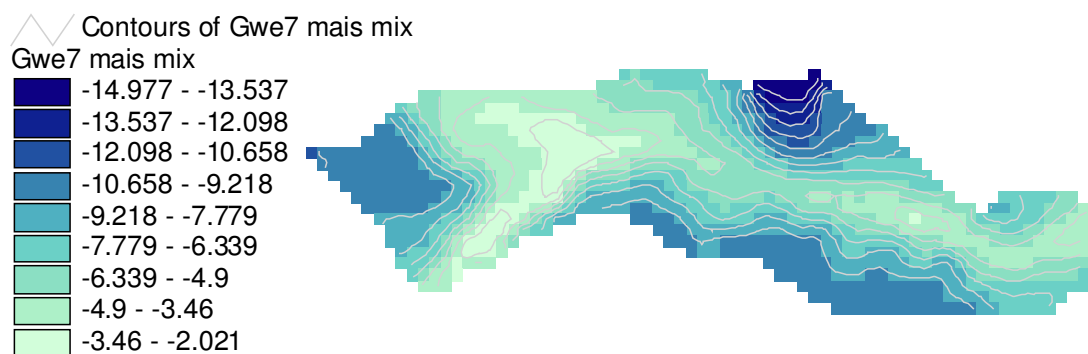


Abbildung 7.7 a Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendelung mit geschätztem K_f -Wert von E^{-7} und differenziertem Bodengrid

Figure 7.7 a Ground water table-grid, K_f -Value E^{-7} , mixed soil type

Bei der zweiten Modellvariante wird der Boden durch eine einheitlich repräsentative Bodenfläche, dem Bodentyp SIL, beschrieben. Der K_f -Wert im Grundwasserkörper ist bei der Standardvoreinstellung mit E^{-7} festgelegt (Abb. 7.7b). In dieser Variante wurde die Schichtmächtigkeit des Bodenprofils etwas verringert, damit der Grundwasserstand sich in einer angemessenen Spiegellage einpendelt. Beide Grundwasserstandsgrids bilden alternative untere Randbedingungen für die weiteren Berechnungen.

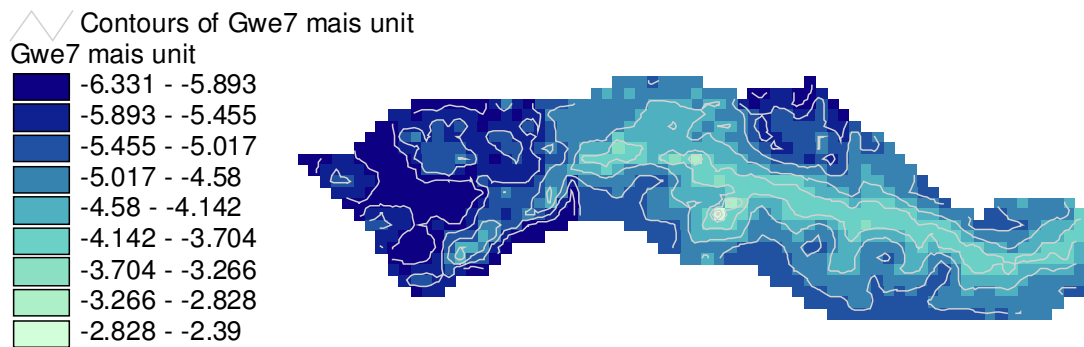


Abbildung 7.7 b Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinstellung mit einem geschätzten K_f -Wert von E^{-7} und SIL-Boden

Figure 7.7 b Ground water table-grid, K_f -Value E^{-7} , soil type SIL

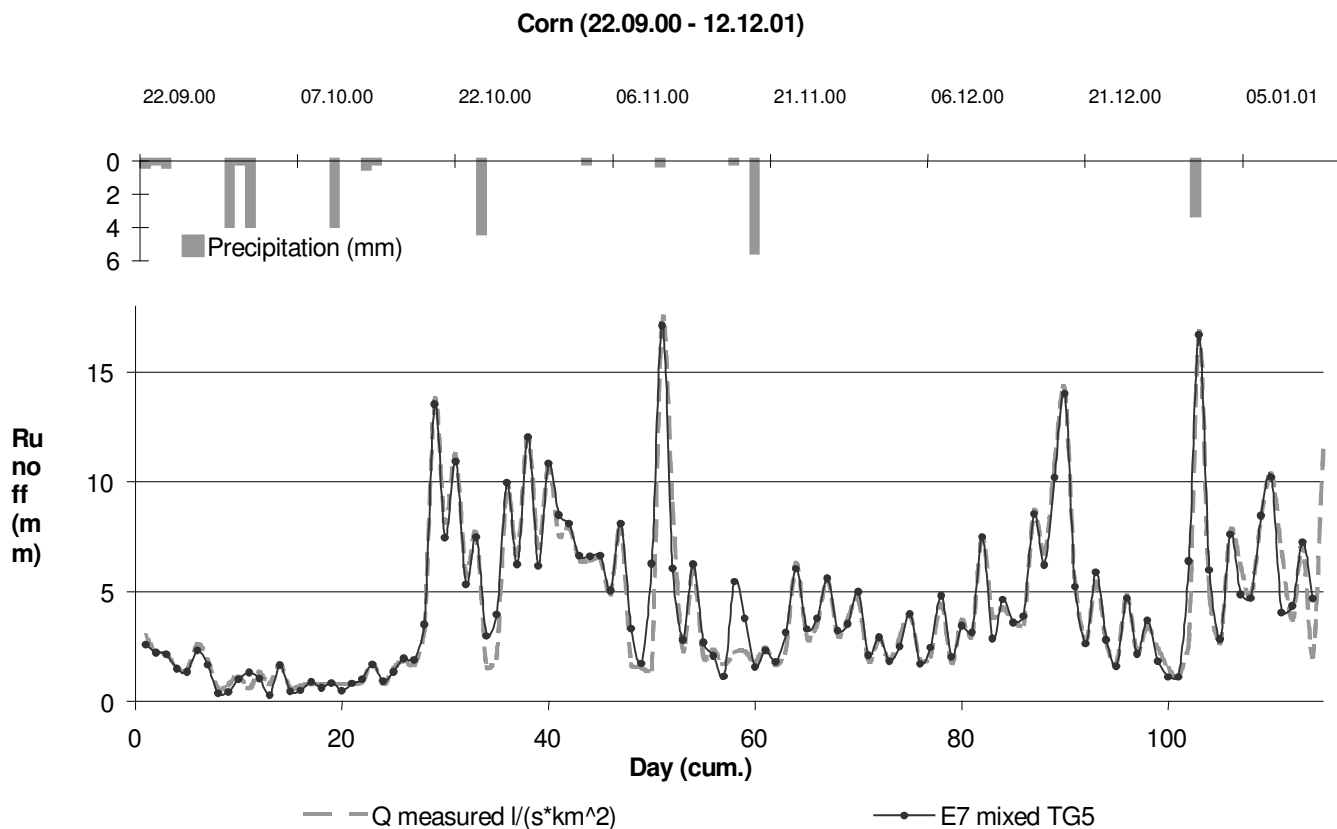


Abbildung 7.8 a Abflußganglinie während der Maisbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (TG5) und differenziertes Bodengrid

Figure 7.8 a Regime curve on the base of different zone-grids and with mixed soil grid

Die in Abb. 7.8a dargestellte Simulation basiert auf dem differenzierten Bodengrid. Die schwarz dargestellte Ganglinie *E7 mixed TG5* zeigt den Abfluß, welcher nur mit zusätzlicher Bewässerung erreicht werden kann, denn in dieser Zeit fallen nur geringe Niederschläge. Der Verlauf dieser Ganglinie kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $0.99 R^2$ angenähert werden.

Am 18.11.2000 reagiert die Simulation jedoch bereits vor einem Niederschlagsereignis und ohne Bewässerungseinfluß mit erhöhtem Abfluß. Gleichzeitig wird jedoch ein erheblicher Zulauf aus dem externen Kanal registriert. Vermutlich verhindern in diesem Fall hohe Bodenfeuchte im Oberboden die Infiltration.

Die zweite Simulationsvariante in Abb.7.8b ist auf Grundlage des Bodentyp SIL berechnet. Auch hier wurde die Simulation durch zusätzliche Bewässerungsgaben angepaßt. Obwohl die Bodenfeuchteverhältnisse mit einem sehr langen Vorlauf von sechs Monaten eingespielt worden sind, wird in den ersten Tagen der Oberflächenabfluß (*E7 SIL TG5*) etwas überschätzt, während es in der Zeit vom 18.11.2000 gelingt den Abfluß gering zu halten. Diese Modellvariante kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $0.92 R^2$ anpaßt werden.

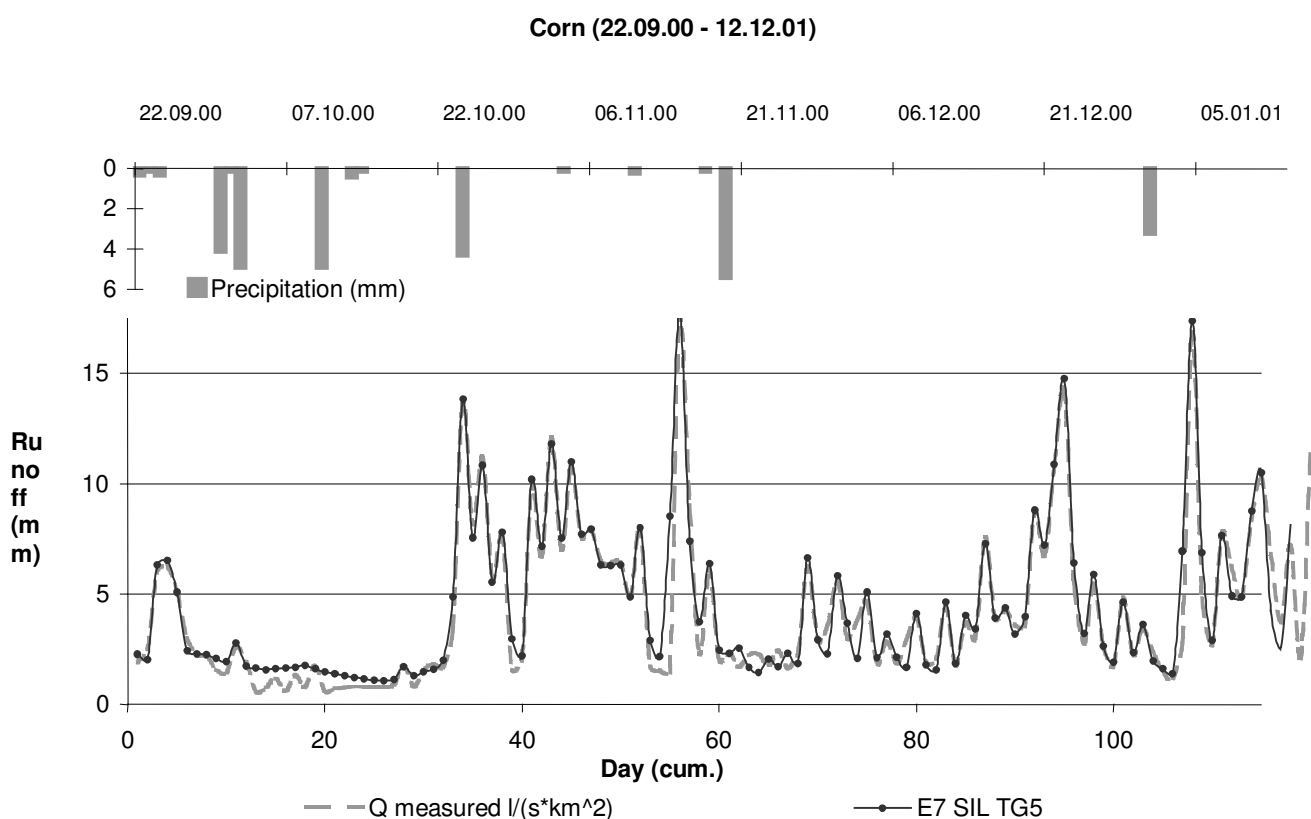


Abbildung 7.8 b Abflußganglinie während der Maisbauperiode vom 22.09.2000 - 12.01.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (TG5) und SIL-Bodengrid

Figure 7. 8 b Regime curve on the base of different zone-grids and with unit soil grid

Bei dem Modellszenario für den Kartoffelanbau vom 03.01.2001-04.04.2001 entsprechen die Rahmenbedingungen denen, der vorangegangenen Simulationsbeispiele. So ist bei dem differenziertem Bodengrid die stabile GW-Spiegellage durch hydraulische Gleichgewichtseinpendlung erreicht worden (Abb. 7.9a). Für den SIL-Boden wird die GW-Spiegellage mittels Standardvoreinstellung festgelegt (Abb. 7.9b). Die Abb. 7.9a und 7.9b verdeutlichen die sich hieraus ergebenden unterschiedlichen unteren Randbedingungen der Grundwasserstände.

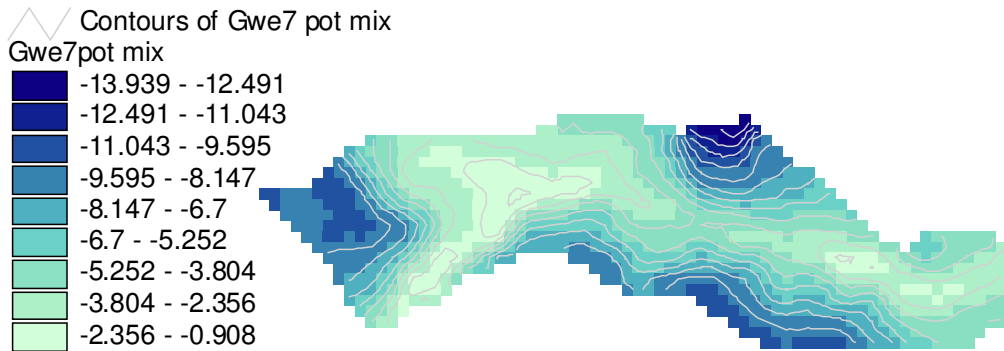


Abbildung 7.9 a Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit einem geschätzten K_f -Wert von E^{-7} und differenziertem Bodengrid

Figure 7.9 a Ground water table-grid, K_f -Value E^{-7} , mixed soil type

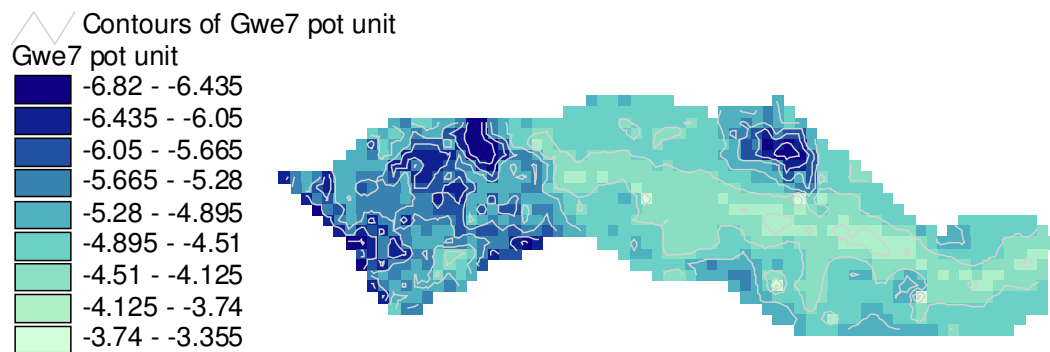


Abbildung 7.9 b Grundwasserstand bei wiederholter hydraulischer Gleichgewichtseinpendlung mit einem geschätzten K_f -Wert von E^{-7} und SIL-Boden

Figure 7.9 b Ground water table-grid, K_f -Value E^{-7} , soil type SIL

Die Kartoffel wird wie der Mais auf den Terrassen in Furchen angebaut, die hier in einem Abstand von 60–70 cm angelegt werden und eine Furchenhöhe von etwa 25 cm aufweisen. Die Kartoffelpflanzen werden in den Furchen durch Einstauen bis zur Hälfte der Furchenhöhe bewässert. Da zu Beginn dieser Anbauperiode keine Niederschläge gemessen wurden und dennoch der Oberflächenabfluß mit starken Fluktuationen reagiert, ist jede Abflußspitze für

Bewässerungsaktivitäten im Einzugsgebiet kennzeichnend. Das kann aber nur modelltechnisch nachvollzogen werden, solange ausreichend Bewässerungswasser über den externen Kanal in das Gebiet eingeleitet wird.

Durch Anpassung einzelner Bewässerungsgaben kann bei der Simulation mit differenziertem Bodentyp in Abb. 7.8a eine Annäherung mit einem Bestimmtheitsmaß von $0.95 R^2$ erzielt werden. Dagegen erreicht die zweite Modellvariante (Abb. 7.8b) mit einheitlichem SIL Bodentyp einen Wert von $0.97 R^2$. Beide Abflußszenarien reagieren im letzten Monatsabschnitt mit zunehmend geringerem Abfluß, was auf Anpassungsschwierigkeiten der Bodenfeuchte zurückzuführen ist.

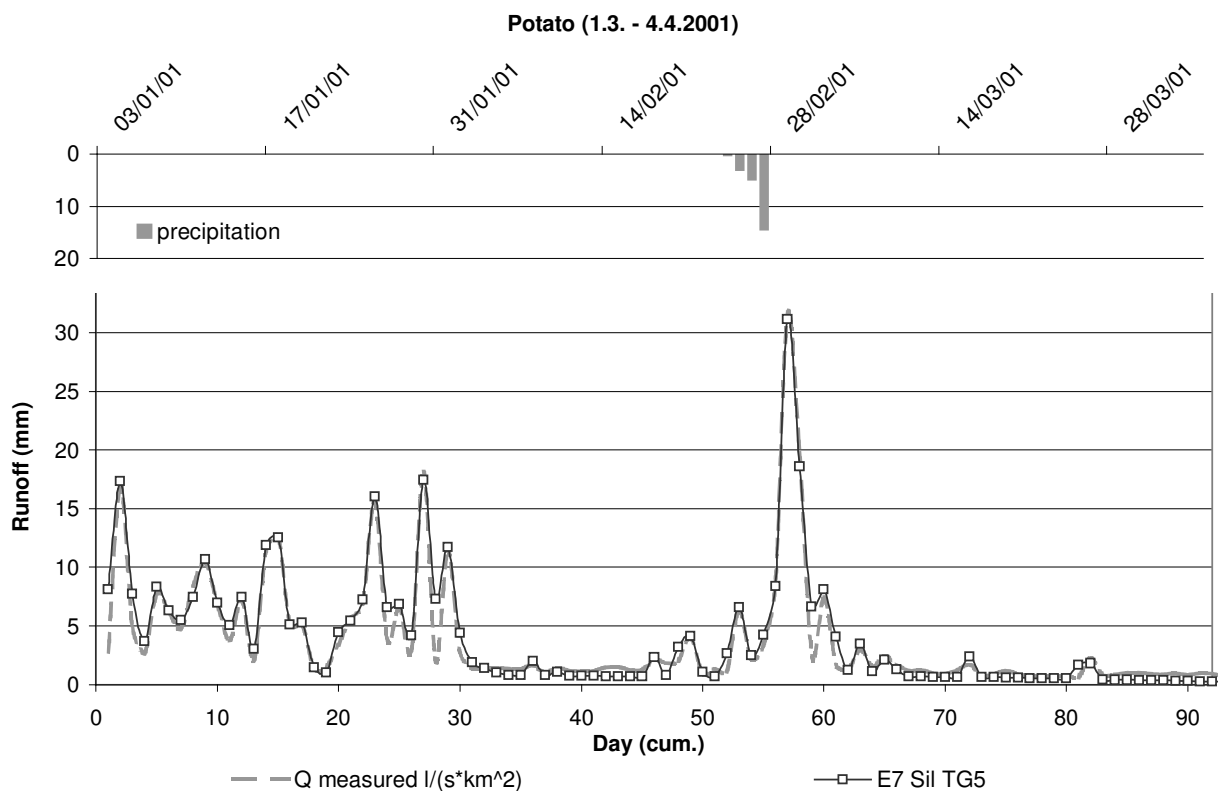


Abbildung 7.10 a Abflußganglinie während des Kartoffelanbaus vom 03.01.2001 - 04.04.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (TG5) und differenziertes Bodengrid

Figure 7.10 a Regime curve on the base of different zone-grids and with mixed soil grid

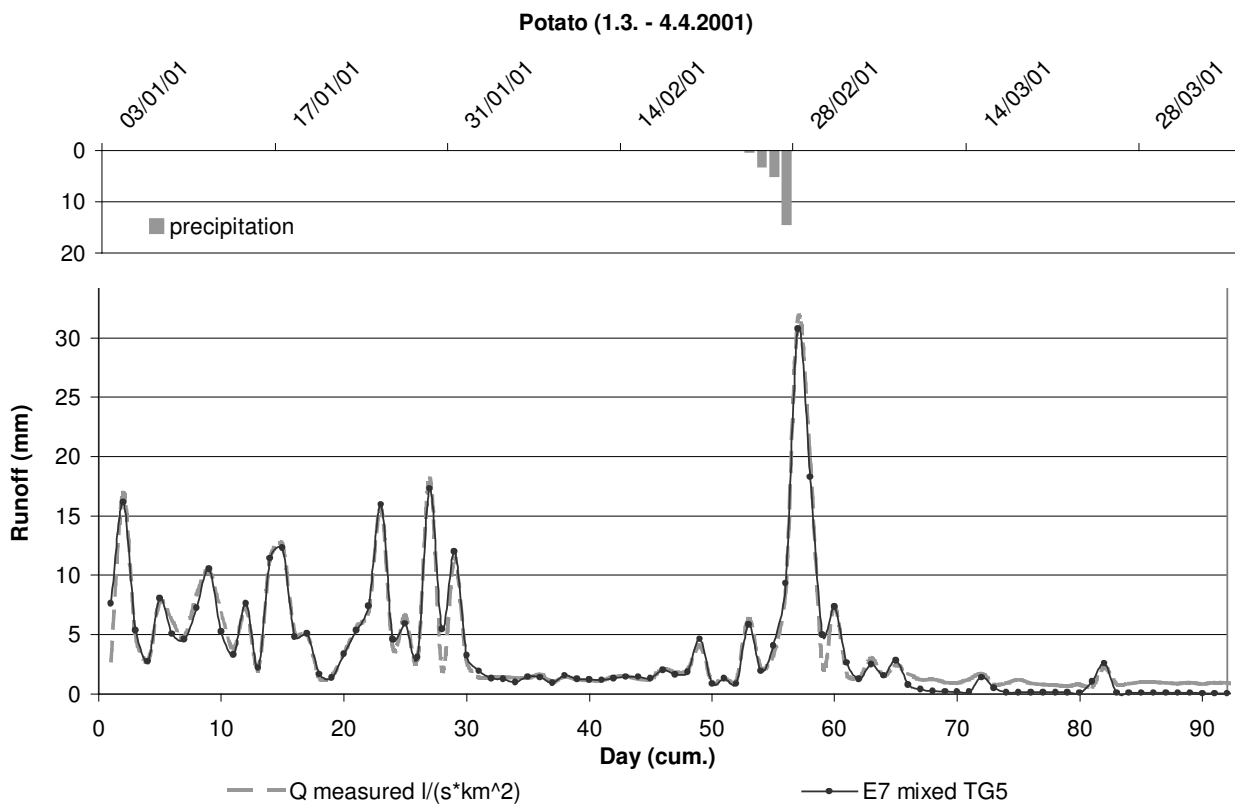


Abbildung 7.10 b Abflußganglinie während des Kartoffelanbaus vom 03.01.2001 - 04.04.2001 mit Bewässerung. Basis: Zonengrid (TG5) und SIL-Bodengrid

Figure 7.10 b Regime curve on the base of different zone-grids and with unit soil grid

7.2 Modellauswertung und Wasserhaushaltsbilanzierung

Um die potentiell zur Verfügung stehenden Bewässerungsmengen während der einzelnen Anbauabschnitte einschätzen und modellieren zu können, empfiehlt es sich, zunächst die gemessenen Zuflüsse des externen Kanals auszuwerten. Die Tabelle 7.1 zeigt die ermittelten Bewässerungskapazitäten, die als Richtwerte für die jeweiligen Simulationsabschnitte genutzt werden können.

Zulauf (NPAD)	Reis	Mais	Kartoffel
Datum	15.05.00-12.08.00	22.09.00- 12.01 01	01.01.01-04.04.01
Tage (Wachstumsperiode)	90	113	94
l/s	5.61	8.95	6.69
m ³ /d	484.33	773.51	577.97
mm pro 10 m Grid (für EZG = 93900 m ²)	5.16	8.24	6.16
mm pro Bew.-fläche (ca. 58%)	8.89	14.2	10.61
mm Bew.-bedarf pro Wachstumsperiode	800.38	1604.91	997.56

Tabelle 7.1 Bewässerungskapazitäten aus dem externen Kanal (NPAD)
Table 7.1 Determined irrigation water capacity taken from the canal NPAD

In Tab. 7.1 sind die Zeitabschnitte für die drei beobachteten Kulturen und die Dauer der Wachstumsperioden in Tagen aufgelistet. Für diese Modellabschnitte wird die mittlere Bewässerungswassermenge aus dem externen Zulauf über den gesamten Beobachtungszeitraum in l/s bzw. m³/d ermittelt. Da das Bezugsgrid durch Skalenwechsel von 2.5 m² auf 10 m² aggregiert wurde (mittels Zusatzprogramm TANALYS) und dadurch eine etwas kleinere Berechnungsfläche entsteht (statt 10 ha nur noch 9.39 ha), wird eine Umrechnung auf die Gridfläche notwendig, so daß die zur Verfügung stehende Tagesmenge für jede Zelle in mm Spende abgeschätzt werden kann. Weil nicht alle Flächen gleichzeitig bewässert werden und eine Fläche von nur ca. 58 % über die Kartierung ermittelt wurde (vgl. Abb. 7.2), wird Bezug auf die bewässerte Gridfläche genommen und in mm Wassersäule veranschlagt. Die letzte Zeile gibt die gesamte Bewässerungsmenge an, die über die drei Wachstumsperioden aufgebracht werden könnte.

Im Hinblick auf die dargelegten Kapazitätseinschätzungen aus dem Bewässerungskanal (Tab. 7.1), lassen sich die Modellumsetzungen der jeweiligen Szenarien in Bezug auf zulässige Bewässerungsgaben besser bewerten und Wasserhaushaltsbilanzierungen anpassen bzw. abschätzen.

Modellmäßig erhält der Anbauzeitraum für Reis (15.05.00-12.08.00) insgesamt einen Input von ca. 594 mm Regen und 464 mm aus dem Kanalufluß (s. Tab. 7.2). Für die Modellvariante des CL-Bodens (Abb. 7.4) ist am Gebietsauslaß (Q_{ges}) eine Abfußspende von ca. 803 mm berechnet worden. Der Output für die Variante mit differenziertem Bodentyp (Abb. 7.6) ergibt ca. 865 mm. Dieses entspricht bei der ersten Variante einer Überschätzung gegenüber der gemessenen Spende von knapp 20 % bei der zweiten von sogar ca. 29 %. Die potentielle ETP erreicht in beiden Modellvarianten 554 mm, welches gegenüber der gemessenen und modifizierten Class-A-Pan Verdunstung (411 mm) mit ca. 34 % überschätzt wird. Die Szenarien reagieren beide mit negativer Bilanz, die mit -296 mm, bei der zweiten Variante mit -361 mm quantifiziert werden (s. Abb. 7.11a und 7.11b sowie im Tab. 7.2a und 7.2b). Zur Aufrechterhaltung der Ganglinie sind für den CL-Boden insgesamt 800 mm

Bewässerungsmenge aufgewendet worden, für den differenzierten Bodentyp benötigte die Simulation 844 mm. Dementsprechend beträgt der Anteil des gesamten Inputs für den aufgetragenen Bewässerungsbedarf 76 % bzw. im zweiten Beispiel 78 %. In beiden Fällen werden für die Anpassung der Abflußganglinie 43 Bewässerungsgaben erforderlich. Die einzelnen Bewässerungsgaben erfolgen nicht täglich und schwanken somit beträchtlich, doch im täglichen Mittel erweisen sich im CL-Szenario 8.8 mm/Tag als realistisch, in dem zweiten Szenario übersteigt der Wert den potentiell ermittelten Wert und erreicht 9 mm/Tag. Für den 06.07.00 ist beispielsweise eine Bewässerungsgabe von bis zu 43.5 mm notwendig geworden. Nachdem ab dem 14.07.00 die Regenzeit verstärkt einsetzt und Niederschläge von 28 mm (N), 34 mm (N) oder sogar 47 mm (N) aufgezeichnet wurden, reagiert die Modellanpassung mit zunehmender Ungenauigkeit. Die anfänglich angepaßten Modellparameter, die in den ersten zwei Monaten zufriedenstellende Bedingungen geschaffen haben, erweisen sich im letzten Drittel für die Hauptmonsunzeit als leidlich zutreffend. Eine separate Simulation des letzten Drittels könnte möglicherweise bessere Ergebnisse erzielen (Stückelung des Simulationsabschnittes). Trotz des Vorbehalts für das letzte Drittel dieser Reisanbausaison sollen die folgenden Darstellungen Abb. 7.11a und 7.11b einen Eindruck über die Ergebnisse und die daraus resultierenden Bilanzen vermitteln. Daran anschließend geben Bezugstabellen detaillierten Einblick über quantitative Größenordnungen. Dabei stehen im folgenden die oberen Tabellenblöcke den in blau gekennzeichneten Input (Regen, Kanalspende (9.39ha) und gesamter Input) dem in grün gekennzeichneten Output (Qges, pot. Evapotranspiration und gesamter Output) gegenüber und markieren die ermittelt Bilanz in rot. Im unteren Tabellenblock wird auf den aktuellen Output (akt. Verdunstung, Interzeption und gesamte aktuelle Verdunstung) mit Bilanzen verwiesen. Ferner geben zusätzliche Informationen Auskunft über die ursprünglich ermittelte Kanalspende (gemäß 10ha) und den berechneten Bewässerungsverbrauch, sowie die tatsächlich gemessenen Abflußspenden am Gebietsauslaß.

In den Diagrammen bestimmen Niederschlag (N) und Kanal bzw. N+Kanal den Input, Verdunstung (V) und Abfluß (NPAK) bzw. V+NPAK ergeben den Output. Anhand der Linien, die in rot die potentielle und orange die aktuelle Wasserhaushaltsbilanz beschreiben, läßt sich der monatliche Verlauf ablesen.

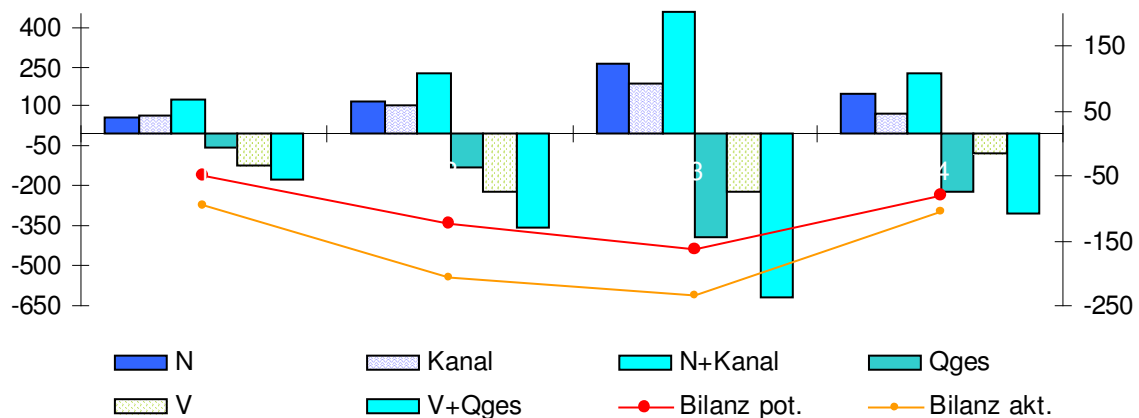


Abbildung 7.11 a Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.00 - 12.08.2000 mit CL-Boden
 Figure 7.11 a Water balance regarding to paddy based on CL-soil grid (15.05.00 to 12.08.2000)

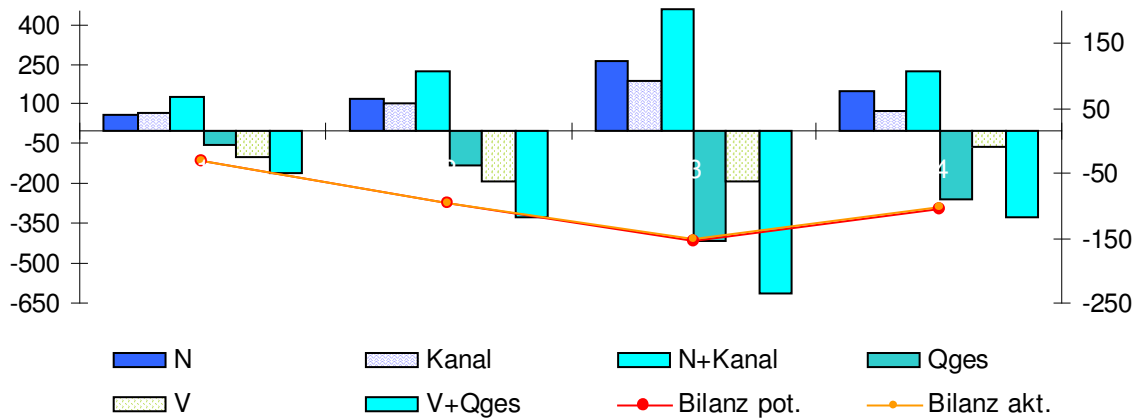


Abbildung 7.11 b Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.2000 - 12.08.2000 mit differenziertem Boden
 Figure 7.11 b Water balance regarding to paddy based on mixed soil grid (15.5.00 to 12.8.00)

Tabelle 7.2 a Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.00 - 12.08.2000 mit CL-Boden
 Table 7.2 a Water balance regarding to paddy based on CL-soil grid (15.05.00 to 12.08.2000)

	Regen	Kanal (9.39 ha)	N+Kanal	Qges	E pot	Epot+Qges	Bilanz
Teil Mai 00	61.30	67.91	129.21	52.67	104.72	157.39	-28.18
Jun. 00	120.30	114.15	234.45	132.64	192.55	325.19	-90.74
Jul. 00	264.90	202.35	467.25	393.92	192.74	586.65	-119.40
Teil Aug. 00	147.90	79.81	227.71	223.56	64.35	287.91	-60.20
Summe	594.40	464.22	1058.62	802.78	554.35	1357.13	-298.52

	E real	Interzept	Eakt+I+Qges	Bilanz	Kanal (10 ha)	Bew	Spende gem.
Teil Mai 00	58.19	45.42	156.28	-27.07	63.76	119.50	44.79
Jun. 00	110.15	81.69	324.48	-90.03	107.19	206.54	97.01
Jul. 00	118.07	72.86	584.85	-117.60	190.01	364.00	376.04
Teil Aug. 00	39.72	24.45	287.73	-60.01	74.94	110.00	153.02
Summe	326.13	224.43	1353.33	-294.72	435.90	800.04	670.86

Tabelle 7.2 b Wasserhaushaltsbilanzierung während der Reisanbauperiode vom 15.05.2000 - 12.08.2000 mit differenziertem Boden
 Table 7.2 b Water balance regarding to paddy based on mixed soil grid (15.5.00 to 12.8.00)

	Regen	Kanal (9.39 ha)	N+Kanal	Qges	E pot	Epot+Qges	Bilanz
Teil Mai 00	61.30	67.91	129.21	53.72	104.72	158.43	-29.22
Jun. 00	120.30	114.15	234.45	132.29	192.55	324.84	-90.39
Jul. 00	264.90	202.35	467.25	418.14	192.74	610.88	-143.63
Teil Aug. 00	147.90	79.81	227.71	261.16	64.35	325.51	-97.80
Summe	594.40	464.22	1058.62	865.31	554.35	1419.67	-361.05

	E real	Interzept	Eakt+I+Qges	Bilanz	Kanal (10 ha)	Bew	Spende gem.
Teil Mai 00	52.51	51.44	157.66	-28.46	63.76	113.00	44.79
Jun. 00	107.06	83.83	323.18	-88.73	107.19	200.60	97.01
Jul. 00	116.65	72.97	607.76	-140.51	190.01	410.70	376.04
Teil Aug. 00	39.42	24.45	325.03	-97.32	74.94	120.00	153.02
Summe	315.63	232.69	1413.64	-355.02	435.90	844.30	670.86

Entsprechend dem Modellszenario für den Maisanbau vom 22.09.00-12.01.01 ergeben sich folgende Bilanzen:

Die Modellberechnung erhält über den beobachteten Zeitraum als Input insgesamt 29 mm Regen und aus dem Zufluß 930 mm. Mit Bezug auf die Modellvariante (a) des SIL-Bodens (Abb. 7.8a) ist am Gebietsauslaß eine Abflußspende von ca. 510 mm (Q_{ges}) berechnet worden. In der zweiten Modellvariante (b) mit differenziertem Bodentyp (Abb. 7.8b) errechnet sich der Output zu 481 mm (Q_{ges}). Dieses entspricht bei der ersten Variante einer Überschätzung von 3 % bei der zweiten erreichte die Annäherung ca. 97 %. Des weiteren erreicht die potentielle ETP in beiden Modellvarianten einen Wert von ca. 304 mm, gleichbedeutend etwa einer Überschätzung gegenüber der gemessenen und modifizierten Class-A-Pan Verdunstung (257 mm) von 18 %. Beide Szenarien reagieren mit positiven Bilanzen und sind bei (a) mit 146 mm, dann bei (b) mit 175 mm quantifiziert worden (s. Abb. 7.12a und 7.12b sowie Tab. 7.3a und 7.3b). Zur Aufrechterhaltung der Ganglinie wird für den SIL-Boden insgesamt 744 mm Bewässerungsmenge aufgewandt, für den differenzierten Bodentyp benötigt die Simulation 805 mm. Aus den sprunghaft verlaufenden Ganglinien in Abb. 7.8a und 7.8b ist ersichtlich, daß es sich hier nur um zusätzliche Bewässerungsgaben handeln kann, da die Abflußspitzen in den meisten Fällen nicht mit Niederschlagsereignissen korrespondieren und in regelmäßigen Intervallen von zwei bis mehr Tagen erfolgen. Auch hier werden bezüglich der Wassergaben extreme Mengenunterschiede beobachtet, wobei in Variante (b) am 11.11.00 sogar ein Maximalwert von bis zu 32 mm aufgebracht werden mußte, um eine derartige Abflußspitze auslösen zu können. In Anbetracht des Wirkungsgrades beim Wasserverbrauch und einer mittleren Verdunstungsrate von 4 mm/Tag E_{pan} (Grundwert des Wasserverbrauchs) liegen die Bewässerungsgaben hierbei im Mittel bei 6.6–7.1 mm/Tag. Anhand dieser Berechnung würden in Variante (a) fast 80 % des Zulaufwassers bzw. 76 % des gesamten Inputs, in Variante (b) 86 % bzw. 84 % des gesamten Inputs nur für Bewässerungszwecke verwendet werden. Die folgenden Darstellungen in Abb. 7.12a und 7.12b und ihre Bezugstabellen 7.3a und b vermitteln einen Eindruck über die Bilanzierung der vorgestellten Maisanbauszenarien.

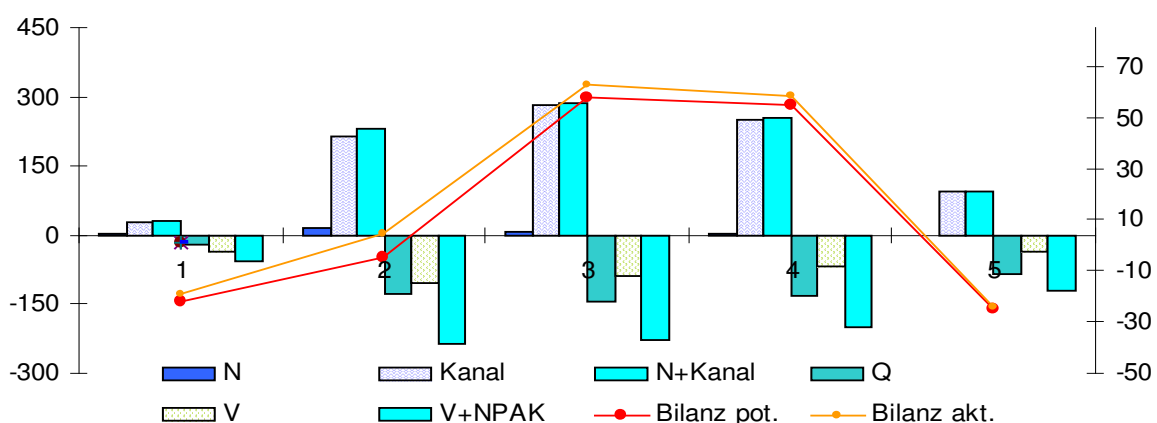


Abbildung 7.12 a Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit SIL-Boden

Figure 7.12 a Water balance regarding to corn based on SIL soil grid (22.09.00 to 12.01.2001)

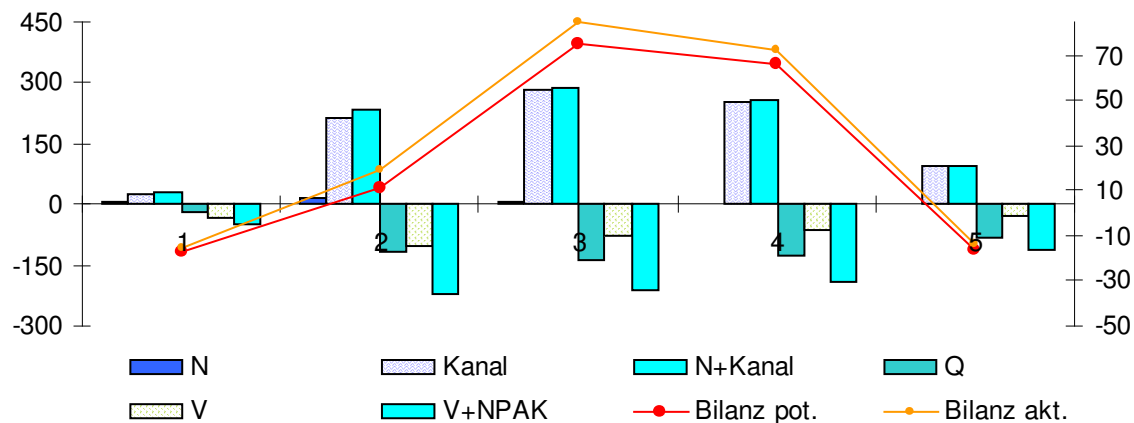


Abbildung 7.12 b Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit differenziertem Boden

Figure 7.12 b Water balance regarding to corn based on mixed soil grid (22.09.00 to 12.01.2001)

Tabelle 7.3 a Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit SIL-Boden

Table 7.3 a Water balance regarding to corn based on SIL soil grid (22.09.00 to 12.01.2001)

	Regen	Kanal (9.39 ha)	N+Kanal	Qges	E pot	Epot+Qges	Bilanz
Teil Sept. 00	4.87	29.88	34.75	20.35	32.88	53.23	-18.48
Okt. 00	14.93	229.54	244.47	129.58	100.34	229.93	14.54
Nov. 00	5.90	300.49	306.39	143.34	77.65	220.99	85.40
Dez. 00	3.26	268.56	271.82	130.58	62.30	192.87	78.95
Teil Jan 01	0.00	102.37	102.37	85.79	30.54	116.33	-13.96
Summe	28.96	930.85	959.81	509.65	303.71	813.36	146.45

	E real	Interzept	Eakt+I+Qges	Bilanz	Kanal (10 ha)	Bew	Spende gem.
Teil Sept. 00	29.39	2.22	51.96	-17.21	28.06	33.00	16.28
Okt. 00	88.40	7.94	225.93	18.54	215.54	204.00	119.10
Nov. 00	66.48	15.24	225.06	81.33	282.16	203.50	135.61
Dez. 00	47.32	19.03	196.93	74.89	252.18	178.80	127.01
Teil Jan 01	21.81	12.34	119.94	-17.57	96.13	125.00	95.78
Summe	253.39	56.78	819.82	139.99	874.07	744.30	493.77

Tabelle 7.3 b Wasserhaushaltsbilanzierung während der Maisanbauperiode vom 22.09.00 - 12.01.2001 mit differenziertem Boden

Table 7.3 b Water balance regarding to corn based on mixed soil grid (22.09.00 to 12.01.2001)

	Regen	Kanal (9.39 ha)	N+Kanal	Qges	E pot	Epot+Qges	Bilanz
Teil Sept. 00	4.87	29.88	34.75	17.43	32.88	50.31	-15.56
Okt. 00	14.93	229.54	244.47	119.10	100.34	219.44	25.03
Nov. 00	5.90	300.49	306.39	135.61	77.65	213.26	93.13
Dez. 00	3.26	268.56	271.82	127.01	62.30	189.31	82.51
Teil Jan 01	0.00	102.37	102.37	82.28	30.54	112.82	-10.44
Summe	28.96	930.85	959.81	481.43	303.71	785.14	174.67

	E real	Interzept	Eakt+I+Qges	Bilanz	Kanal (10 ha)	Bew	Spende gem.
Teil Sept. 00	27.34	3.28	48.05	-13.30	28.06	40.00	16.28
Okt. 00	83.79	8.05	210.94	33.53	215.54	233.00	119.10
Nov. 00	59.67	7.64	202.91	103.48	282.16	221.50	135.61
Dez. 00	41.10	14.66	182.77	89.06	252.18	182.50	127.01
Teil Jan 01	17.73	9.29	109.31	-6.93	96.13	128.00	95.78
Summe	229.62	42.93	753.98	205.83	874.07	805.00	493.77

Bei dem Modellszenario für den Kartoffelanbau (01.01.01-04.04.01) erhält die Modellberechnung als Input nur knapp 31 mm Regen, während der Zufluß ca. 576 mm in das Einzugsgebiet einspeist. Bei der Modellvariante (a) mit SIL-Bodens (Abb. 7.10a) ist am Gebietsauslaß eine Abfußspende von 373 mm (Q_{ges}) ermittelt worden, welches 5 % über dem gemessenen Wert liegt. Die zweite Modellvariante (b) mit differenziertem Bodentyp (Abb. 7.10b) errechnete sich mit ca. 341 mm (Q_{ges}) bei 96 %iger Annäherung. Des weiteren erreichte die potentielle ETP in beiden Modellvarianten über den gesamten Zeitraum einen Wert von ca. 546 mm. Da gemessene und modifizierte Class-A-Pan Verdunstung nur bis zum 10.03.01 vorliegen, bleiben die restlichen 25 Tage ohne Vergleichswerte. Beide Szenarien reagieren mit negativen Bilanzen, die bei (a) zu -309 mm und bei (b) zu -277 mm berechnet werden konnten (s. Abb. 7.13a und 7.13b sowie Tab. 7.4a und 7.4b). Dieser Anbauabschnitt zeigt deutliche Abflußspitzen ohne Niederschlagsbeeinflüsse (vgl. Abb. 7.10a und b), die auch hier durch Bewässerung ausgelöst worden sind. Zur Aufrechterhaltung der Ganglinie mußten für den SIL-Boden insgesamt 724 mm Bewässerungsmenge aufgewandt werden, der differenzierte Bodentyp benötigte 731 mm. Die Bewässerungsintervalle erfolgen zumeist nach zwei Tagen und lassen zum Ende der Wachstumsperiode erkennbar nach. Auch hier werden bezüglich der Wassergaben extreme Mengenunterschiede aufgebracht. In Anbetracht des Wirkungsgrads beim Wasserverbrauch und einer mittleren modellierten Verdunstungsrate von 11 mm/Tag E_{pan} liegen die gemittelten Bewässerungsgaben hierbei niedriger und erreichen Werte etwas mehr als 7 mm/Tag. Die folgenden Darstellungen in Abb. 7.13a und 7.13b vermitteln einen Eindruck über die Bilanzierung der vorgestellten Kartoffelanbau-Szenarien.

Abbildung 7.13 a Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.01 - 04.04.2001 mit SIL-Boden
Figure 7.13 a Water balance regarding to potato based on SIL soil grid (01.01.01 to 04.04.2001)

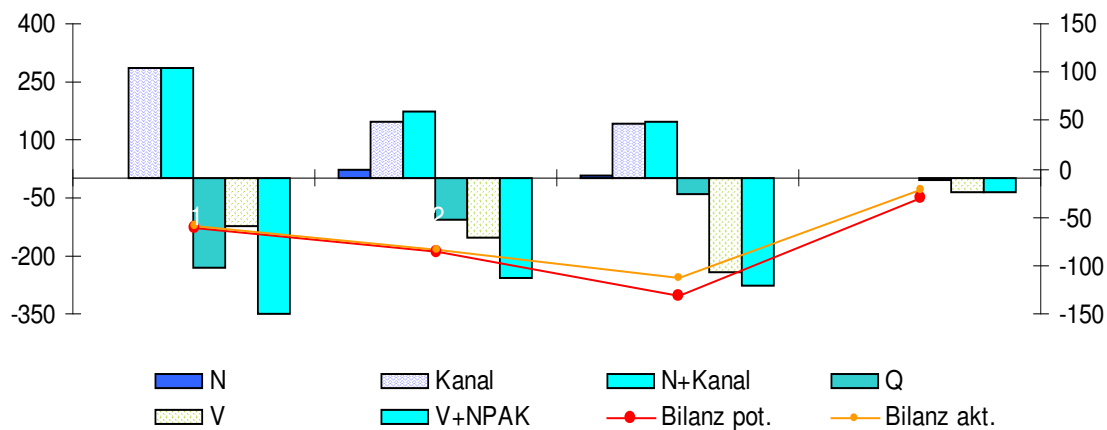


Abbildung 7.13 b Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.01 - 04.04.2001 mit differenziertem Boden
 Figure 7.13 b Water balance regarding to potato based on mixed soil grid (01.01.01 to 04.04.2001)

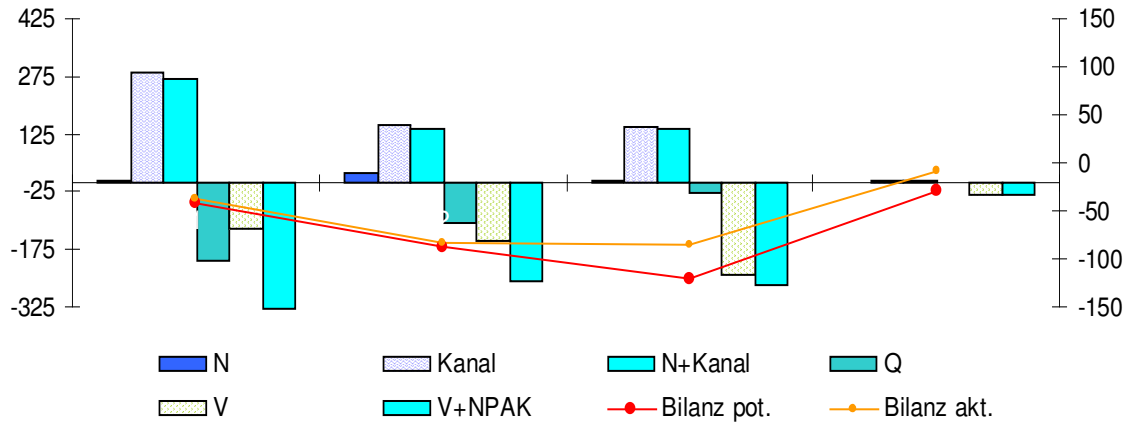


Tabelle 7.4 a Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.01 - 04.04.2001 mit SIL-Boden
 Table 7.4 a Water balance regarding to potato based on SIL soil grid (01.01.01 to 04.04.2001)

	Regen	Kanal (9.39 ha)	N+Kanal	Qges	E pot	Epot+Qges	Bilanz
Jan. 01	2.70	284.17	286.87	228.61	120.03	348.64	-61.77
Feb. 01	22.80	147.92	170.72	105.67	151.58	257.24	-86.52
März 01	5.00	142.43	147.43	37.83	241.27	279.10	-131.68
Teil Apr. 01	0.10	4.07	4.17	0.91	32.77	33.67	-29.50
Summe	30.60	578.59	609.19	373.02	545.64	918.66	-309.47

	E real	Interzept	Eakt+I+Qges	Bilanz	Kanal (10 ha)	Bew	Spende gem.
Jan. 01	80.28	37.68	346.56	-59.69	266.84	330.00	201.85
Feb. 01	95.74	52.22	253.62	-82.90	138.90	220.50	105.95
März 01	170.23	52.18	260.24	-112.82	139.53	173.50	42.95
Teil Apr. 01	23.99	0.00	24.89	-20.72	3.82	0.00	3.38
Summe	370.24	142.07	885.33	-276.14	549.09	724.00	354.13

Tabelle 7.4 b Wasserhaushaltsbilanzierung während der Kartoffelanbauperiode vom 01.01.01 - 04.04.2001 mit differenziertem Boden
 Table 7.4 b Water balance regarding to potato based on mixed soil grid (01.01.01 to 04.04.2001)

	Regen	Kanal (9.39 ha)	N+Kanal	Qges	E pot	Epot+Qges	Bilanz
Jan. 01	2.70	284.17	286.87	207.68	120.03	327.71	-40.84
Feb. 01	22.80	147.92	170.72	105.91	151.58	257.49	-86.77
März 01	5.00	142.43	147.43	26.81	241.27	268.08	-120.66
Teil Apr. 01	0.10	4.07	4.17	0.15	32.77	32.91	-28.74
Summe	30.60	578.59	609.19	340.55	545.64	886.20	-277.01

	E real	Interzept	Eakt+I+Qges	Bilanz	Kanal (10 ha)	Bew	Spende gem.
Jan. 01	77.97	39.31	324.97	-38.10	266.84	331.50	201.85
Feb. 01	90.25	56.98	253.15	-82.43	138.90	235.00	105.95
März 01	156.60	48.56	231.97	-84.54	139.53	164.50	42.95
Teil Apr. 01	13.04	0.00	13.18	-9.01	3.82	0.00	3.38
Summe	337.86	144.86	823.27	-214.08	549.09	731.00	354.13

7.3 Beurteilung und Diskussion

Im Rahmen des IPMS-Projektes wurde das Modellsystem WaSiM-ETH unter der Zielsetzung erfolgreich angewendet, das charakteristische Fließverhalten im Khet-Einzugsgebiet zu erfassen und zu bilanzieren. Bei den ermittelten Simulationsergebnissen handelt es sich um Modellergebnisse, die unter Ausnutzung aller zur Verfügung stehenden Daten und Informationen entstanden sind. Die Tab. 7.5 vermittelt einen Überblick über die zugrunde gelegte Modellkonfiguration mit skizzierten Quellennachweisen, Parameterermittlungsmethoden sowie Datenqualitäten. Die meteorologischen Eingangsvariablen wurden als gut kennzeichnende Datengrundlage eingestuft, ebenso erwiesen sich die generierten Standardgrids zur Beschreibung der Gebietscharakteristik als objektiv. Da derzeit noch Wissensdefizite bezüglich der Systemverhältnisse und Lage des hoch variablen schwebenden Grundwasserleiters vorhanden waren (SCHUMANN 2002), wurden genaue Definition der Rahmenbedingungen im Untergrund *a priori* festgelegt, wobei zwei alternative Lösungsansätze verfolgt wurden (Standardvoreinstellung oder wiederholter Abruf der Speicherfülle zur Einstellung eines hydraulischen Gleichgewichtszustandes). Außerdem beruhen die Modellberechnungen auf zwei alternative Beschreibungen zur Bodenbeschaffenheit, die einerseits mit einheitlichem bzw. „effektivem“ Bodenparametersatz (a) und andererseits durch räumliche Interpolationsmethode (b) abgeleitet wurden. Einen Auszug der erzielten Modellergebnisse für das exemplarisch ausgewählte Khet-Einzugsgebiete, zeigt Tab. 7.6, in der zu den drei vorgestellten Anbauszenarien Modellübereinstimmungen und Wasserhaushaltsbilanzen dokumentiert werden.

Mittels der verwendeten Modellkonfiguration (s. Tab. 7.5) gelang es folgende Rückschlüsse aus der Modellierung abzuleiten:

- Das Abflußverhalten im Khet-Einzugsgebiet steht in sehr enger Beziehung zur Input-Ganglinie des externen Zulaufs, wodurch der Ganglinienverlauf am Gebietsauslaß nachhaltig übergeprägt wird. Der Khet-Bach erfährt dadurch im Abflußregime eine gebietsuntypische Veränderung zu permanent wasserführenden Verhältnissen.
- Der allochthone Zulauf übt erheblichen Einfluß auf Wasserumsatz, -verbleib bzw. Defizit oder Depot in der Wasserhaushaltsbilanzierung aus.
- Der dynamische Verlauf der Ganglinie wird vorwiegend durch anthropogene Beeinflussung hervorgerufen (Bewässerungsintervalle).
- Das Retentionsverhalten von Niederschlagswasser wird durch das terrassenüberformte bewässerte Einzugsgebiet verstärkt (Muldenrückhalt).
- Die Abflußkomponenten werden hauptsächlich durch Direktabfluß und Interflow gestellt.
- Die Abflußsimulation (Q_{ges}) erreichte im Postmonsun und in der Trockenzeit eine Übereinstimmung von $\pm 3-5 \%$. Im Hauptmonsuns wurde dagegen der Abfluß erheblich überschätzt (s. Tab. 7.6).
- Das Szenario für Reisanbau reagiert trotz hoher Monsunniederschläge mit negativer Wasserhaushaltsbilanz. Für das Szenario des Maisanbaus wird während des Postmonsuns eine positive Bilanz errechnet, die allein durch den zusätzlichen Input des externen Bewässerungskanales bewirkt wird. In der Trockenzeit stellt sich für den Kartoffelanbau wieder eine negative Wasserhaushaltsbilanz ein.
- Während der Modellanwendung wurde das in der Entwicklung befindliche Teilmodul für Bewässerung vom Modellautor J.SCHULLA auf die Bedürfnisse des zu untersuchenden Khet-Einzugsgebietes präzisiert.

- Das Modellpaket WaSiM-ETH wurde erstmalig an einem sehr kleinen Einzugsgebiet (mesoskalärer Raum) bei minimaler Modellkomponentenausnutzung erfolgreich getestet.
- Mit der gegenwärtigen WaSiM-ETH Modellversion ist die Nutzung eines Zusatzmoduls zur Berücksichtigung von Tiefenversickerungen in Makroporensystemen noch nicht vorgesehen.

Tabelle 7.5 Modellkonfiguration
Table 7.5 Model configuration

Modell	Wasserhaushaltsmodell: WaSiM-ETH-Zürich (Schulla & Jasper 1999)
Modellbeschreibung	Deterministisches Modell, flächendetailliert mit modularer Struktur auf physikalischem Ansatz basierend
Modellkonzept	(Abb. 1.2) Verknüpfung an ARC/View (GIS)
Modellaufbau	5 Module: (Abb. 2.5) 2 Kernmodule: Verdunstungsmodul nach Penman-Monteith und Bodenmodul für die ungesättigte Zone nach Richards sowie 3 zusätzliche Bewässerungs-, Grundwasser- und Routing-Module
Modellbedarf	Gis-gestützte räumliche Datensets, zeitliche Datensets (Tab. 4.1)
Modellfragestellung	Wasserhaushaltsbilanz, Abflußganglinieninterpretation
Eingangsvariablen	5 meteorologische Datensätze (Kap. 5.1) zusätzlich in der Steuerdatei: Landnutzungstabelle (Tab. 6.2), Bodenkennwerttabelle (Tab. 6.3)
Parameter	(Tab. 6.1) 5 Bodenparameter (Kap. 6.2), 9 verdunstungsregelnde Parameter (Kap. 6.1),
Horizontalgliederung des Einzugsgebietes	Rasterbasis: 19 Standard- und variable Grids
Modellzeitraum	3 Modellszenarien für Hauptmonsun, Postmonsun und Trockenzeit: Reisanbau 15.05.2000-12.08.2000, Maisanbau 22.09.2000-12.01.2001, Kartoffelanbau 03.01.2001-04.04.2001
Raum-Zeit-Diskretisierung	Zeitlich: 24 Stundenintervall Räumlich: 10m Grid
Probenahme	Punktuelle Stützstellen zur Beurteilung der Bodenbeschaffenheit, Phänodatenmaterial zum Teil aus Feldtests gewonnen
Parameterbestimmung	Anhand äquivalenter Übertragungsfunktionen, Pedotransferfunktion sowie aus Literaturwerten
Transformation der flächenhaften Information	Bodenbeschaffenheit wird entweder durch Strukturanalyse ermittelt oder als Einheitsboden dargestellt. Luftbildinterpretation und Landnutzungskartierung
Schichtaufbau	30 Schichten zu 0.33 cm (s. Tab. 6.4)
Äquiferverhältnisse	hochvariabler schwebender Grundwasserleiter
Anfangsbedingungen	Modelltechnisch bedingte Annahme (ein dynamisches Gleichgewicht des Grundwasserspiegels stellt sich entweder nach mehreren Testläufen ein oder wird als Standardvoreinstellung vorgegeben)
Randbedingungen	Abgrenzung der Einzugsgebietsgröße durch Topographische Analyse ermittelt (TANALYS)
Modellanpassung	Nur in Kombination mit Richards-Ansatz und Bewässerungsmodul möglich Gute Anpassung möglich
Datenqualität	Gut kennzeichnende meteorologische Datengrundlage (Eingangsvariablen). Ungenügende zeitliche Diskretisierung des externen Zulaufs (vgl. Tab. 4.1). Validierung der Verdunstung für Wasserhaushaltsbilanzierung nur bedingt möglich, Diskretisierung nur auf 24 Stundenintervall möglich, Referenzwerte unvollständig. TANALYS verkleinert bei Erhöhung des Schwellenwertes (Festlegung der Fließakkumulationsreichweite) das EZG, welches die Abflußspendenbestimmung beeinflusst. Durch gröbere Skalentransformation (<i>up-scaling</i>) werden die Bewässerungsflächen unterschätzt. Lage des Grundwasserspiegels beruht auf Annahmen.

Tabelle 7.6 Modellergebnisse zu den drei vorgestellten Anbauszenarien
 Table 7.6 Model results of the three cropping scenarios

Reis	CL Boden	diff. Boden	Kommentar
Modellvariante	a	b	Hauptmonsun
Randbedingungen des Äqifers	Standardvoreinstellung	stetige dyn.Einzustellung	Annahme
Bestimmtheitsmaß R^2 (Ganglinienanpassung)	0.89	0.96	gute Anpassung
Bilanz	negativ	negativ	
Qges zu gem. Spende (%)	19.66	28.99	überschätzt
ETP zu gem. Clas A Pan (%)	34.73	34.73	überschätzt
Anteil des Bewässerungswassers (%)			ca.
aus dem gesamten Input (N+Kanal)	75.57	79.76	3/4 des Inputs

Mais	SIL Boden	diff. Boden	Kommentar
Modellvariante	a	b	Postmonsun
Randbedingungen des Äqifers	Standardvoreinstellung	stetige dyn.Einzustellung	Annahme
Bestimmtheitsmaß R^2 (Ganglinienanpassung)	0.92	0.99	gute Anpassung
Bilanz	positiv	positiv	
Qges zu gem. Spende (%)	3.21	97.50	± 3%
ETP zu gem. Clas A Pan (%)	18.10	18.10	überschätzt
Anteil des Bewässerungswassers (%)			
nur aus dem Kanal	77.55	86.48	
aus dem gesamten Input (N+Kanal)	79.96	83.87	

Kartoffel	SIL Boden	diff. Boden	Kommentar
Modellvariante	a	b	Trockenzeit
Randbedingungen des Äqifers	Standardvoreinstellung	stetige dyn.Einzustellung	Annahme
Bestimmtheitsmaß R^2 (Ganglinienanpassung)	0.97	0.95	gute Anpassung
Bilanz	negativ	negativ	
Qges zu gem. Spende (%)	5.33	96.17	± 4-5%
ETP zu gem. Clas A Pan (%)	—	—	kein Vergleich
Anteil des Bewässerungswassers (%)			
nur aus dem Kanal	79.92	79.15	
aus dem gesamten Input (N+Kanal)	84.14	83.34	

Die Simulationsergebnisse der Abflußganglinieninterpretation erzielten hohe Bestimmtheitsmaße (s. Tab. 7.6), welches jedoch nicht gleichzeitig bedeutet, daß die erzielten Modellergebnisse ein bestimmtes Maß an Genauigkeit liefern. Sie liegen aber im richtigen Trend. Dennoch kann durch diese Studie gezeigt werden, daß es möglich ist, mit geringen Inputinformationen realitätsgerechte Ergebnisse zu simulieren. Mögliche Schwachstellen, die zur Ungenauigkeit in den Ergebnissen der Wasserhaushaltsbilanzierung führen könnten, sind ausfindig gemacht und quantitativ eingeschätzt worden. Einige Anmerkungen hierzu werden im Folgenden diskutiert. Ungenauigkeiten wurden jedoch nicht in der Modellumsetzung gesehen, sondern inadäquaten Eingangsdaten bzw. einzelnen Skalentransfers zugeschrieben. Daher muß kritisch betrachtet werden, welche Verlässlichkeit insbesondere die Diskretisierung einzelner Zeitreihen und die Initialwerte im Bodenkörper besitzen.

Im Zuge der Untersuchung stellte sich heraus, daß insbesondere beim zeitlichen Skalentransfer Schwachstellen aufgedeckt werden konnten. Dagegen üben im Anwendungsbeispiel die flächen- und raumdeckenden Aggregationen der Basisdaten von 2.5 m auf 10 m Grid nur unbedeutenden Einfluß auf die Modellberechnung aus, welches in Vorstudien an einzelnen Starkregenereignissen beobachtet werden konnte (PIEPHO 2002 Fig. 3). Im Anwendungsbeispiel wurde jedoch erkennbar, daß durch die Auflösung hydrologischer Zeitreihen die Wechselwirkung zwischen Abflußprozessen stark verzerrt wird. In Kap. 4.1

Abb. 4.10 konnte deutlich gezeigt werden, daß die Niederschlags-Abfluß-Reaktion mit einem zeitlichen Skalenmaßstab von stündlichen oder kleineren Zeitintervallen günstigere Voraussetzungen schaffen. Für die meteorologischen Eingangsdaten wäre dieses durchaus umsetzbar gewesen, wenn nicht der externe, drei Mal täglich handgemessene Zulauf als hydrologischer Datensatz das Abflußverhalten und die Bewässerungskapazität maßgeblich bestimmen würde. Daher ergab sich zwangsweise für die Modellumsetzung ein Zeitauflösung auf einen 24-stündigen Berechnungsintervall, weil die vom Kanalzulauf ausgelösten Prozesse den stärksten Einfluß auf das Abflußgeschehen und somit auf das gesamte Modellergebnis ausüben. Angesichts der nach der geostatistischen Kennwertanalyse beachtlichen Spannweiten der Abflüsse (Meßvergleiche in Tab. 4.1) kann davon ausgegangen werden, daß das handgemessene Abflußvolumen unterschätzt wird und sich über diesen Input Ungenauigkeiten einschleichen. Durch geostatistische Prüfung wird die Input-Unsicherheit dieses hydrologischen Eingangsdatensatzes mit $\pm 20\%$ eingeschätzt. Exaktere Modellergebnisse können nur dann erreicht werden, wenn die dominierenden Prozesse mit höherer Zeitdiskretisierung beschrieben werden (vgl. Kap. 2.3 Abb. 2.4).

Mit Ungenauigkeiten sind auch die Referenzwerte für die Verdunstung aus der Class-A-Pan behaftet (s. Abb. A 4.1). Da der Wasseraustrag durch Verdunstung eine entscheidende Rolle in der Wasserhaushaltsbilanzierung besitzt, bieten die Feldermittlungen eine wichtige Vergleichsgröße, die dann in der Modellberechnung zu Validierungszwecken herangezogen wird. Vor diesem Hintergrund erscheint dieses aber nur bedingt möglich, da während der Aufzeichnung extreme Dateninkonsistenzen registriert wurden (vgl. Kap 4.1.3). Zudem konnte leider nicht der gesamte Beobachtungszeitraum mit Referenzwerten abgedeckt werden. Trotz Bereinigung dieser Daten wurde die relativ grob vorliegende Datenanpassung der ETP-Referenzwerte gegenüber den simulierten ETP-Werten während des Hauptmonsuns um 35 % und im Postmonsun um 18 % überschätzt (s. Tab. 7.6). Daher erscheint die Anpassungsgüte für die berechnete Verdunstung folglich nur bedingt verlässlich und muß daher unter Vorbehalt betrachtet werden.

Neben diesen genannten Umständen (Diskretisierungsfehlern), zur Festlegung der zeitlichen Eingangsvariablen und Referenzdaten, erwies es sich ebenso problematisch gemäß der Modellanforderungen die Randbedingungen im Untergrund angemessen anzunähern.

Besonders kritisch wird hierbei die Beschreibung des hoch variablen schwebenden Grundwasserleiters angesehen, denn die Kenntnis der Randbedingung im Untergrund ist für die Bewässerungsmodellierung unumgänglich. Die Modellläufe können mit Initialgrids arbeiten, die üblicherweise aus gemessenen Daten stammen. Liegen diese aber wie in diesem Fall nicht vor, wird eine angemessene Schätzung der Speicherverhältnisse problematisch. Die statistischen Auswertungen in Kap. 3.2 Tab. 3.1 lassen erkennen, daß die Untersuchungen in einem relativ trockenem Jahr durchgeführt wurden und die Niederschläge geringer ausfielen, als die aus langjährigen Zeitreihen ermittelten jährlichen Niederschlagssummen des Referenzgebietes. Ohne diese Zeitreihen und die gemessenen Bodenspeicherfüllungen wurde dennoch mit den zur Verfügung stehenden Datensätzen versucht, über zwei Lösungsansätze annähernd gute Voraussetzungen zu schaffen, so daß sich der Übergang vom ungesättigten zum gesättigten Bodenkörper realistisch in einen hydraulischen Gleichgewichtszustand einstellen kann. Bei sehr kurzen Datenreihe empfiehlt es sich also, durch wiederholtes Einlesen der Ergebnisse des vorangegangenen Testlaufes langjährig ausgeglichene Bodenwasserverhältnisse vorzutauschen, doch bei dem zur Verfügung stehenden Niederschlagsdatensatz des Beobachtungszeitraums blieb die Inputquantität leider immer gleich gering. Dieses hat zur

Folge, daß sich der idealisierte Grundwasserspiegel zu tief manifestiert. Dagegen würden bei feuchteren Jahrgängen der Grundwasserstand normalerweise wieder ansteigen (s. Abb. 3.5 jährl. Niederschlagsverhältnisse/-Schwankungsbereiche). Eine andere Alternative bietet die Standardvoreinstellung. Nachteil dieser Vorgehensweise ist, daß sich die Grundwasserspiegellage nicht bei anhaltenden trockenen Verhältnissen stabilisieren läßt und der Äquifer somit langsam leer laufen könnte. Auf Grundlage dieser Modellumsetzungskapazität einschließlich der *a priori* festgelegten Rahmenbedingungen im Untergrund ist mit unbedeutender Grundwasserneubildung zu rechnen, welches aber keine unmittelbare Kontaminationsgefahr durch wassergebundene Schadstoffe im Grundwasser darstellt. Hingegen kann die verwendete Parameterkonstellation im Grundwasserkörper in trockenen Zeitabschnitten latente Exfiltration bewirken (Bsp. Abb. A 7.2 im Anhang).

In wieweit die Beschreibung der Bodenbeschaffenheiten realitätsnah erfaßt wurde, bedarf ebenfalls einer sachlichen Bewertung. Hierzu einige Anmerkungen:

Im Vergleich mit den Modellergebnissen aus den Szenarien mit repräsentativem Einheitsboden und mit differenziertem Bodentyp konnte gezeigt werden, daß die unterschiedlichen Rahmenbedingungen zu keinen gravierenden quantitativen Unterschieden in der Bilanzierung führen (s. Bilanztabellen in Kap. 7.1). Befürchtungen, daß durch die gröbere Gridauflösung (*up-scaling*) die flächenhafte Information zu stark generalisiert werden könne, haben sich nicht bewahrheitet. Andererseits wurde aber auch gezeigt, daß durch die Pauschalisierung bzw. Vereinfachung der Bodenbeschaffenheit (*representative elementary areas* REA/WOOD 95) ein einheitlich reagierender Raum geschaffen werden konnte. Generell sind kleine Einzugsgebiete schwerer zu modellieren als große, da sich in größeren Gebieten viele lokale Effekte gegenseitig aufheben und das Gesamtgebiet etwas träger reagiert. Jedoch zeigt sich in den Anwendungsbeispielen, daß die Leitwertannahmen in der Lage sind, die aktuellen Geländebedingungen zu beschreiben, obwohl die Gebietscharakteristik des Bewässerungseinzugsgebiets als relativ heterogen erscheint (vgl. Kap. 2.4). Tatsache ist, daß gerade durch anthropoge Beeinflussung (Bewässerung, Terrassenbau, Becken- und Furchensysteme, Kanalnetz) Starkniederschläge dezentral aufgefangen und dadurch Abflußreaktionen gedämpft werden. Entsprechend der Untersuchungen von SCHUMANN (2002) zur Auffindung bevorzugter Fließwege im Makroporenraum, lassen sich auch im Anwendungsbeispiel ähnliche Phänomene interpretieren. Es konnte belegt werden, daß in vereinzelt Szenarien Ganglinien plötzlich trocken fielen (s. Abb. 7.4 und 7.6 Beispiel Einheitsboden, Reis am 18.6.00 und 16.7.00). Es wird daher angenommen, daß die schweren lehmhaltigen Böden durch tiefgehende Schrumpf- und Quellwirkungen im Makroporensystem plötzliche Änderungen im Abflußverhalten entstehen lassen, wodurch Abflußereignisse vor allem aus konvektiven Niederschlägen schnell über bevorzugte Fließbahnen in tiefere Bodenschichten versickern. Bei gesättigtem Makroporenspeicher oder Porenverschlämmungen wurde der Oberflächenabfluß dagegen gelegentlich in der Modellanwendung überschätzt. Somit nehmen die Makroporen entscheidenden Einfluß auf den Abfluß und führen zu instationären Verhältnissen im Einzugsgebiet. Um eben diese instationären Verhältnisse modelltechnisch in einem sehr kleinen Einzugsgebiet besser beschreiben zu können, bedarf es einer Simulationsstückelung in getrennte Zeitabschnitte. Hierbei müssen die boden- und pflanzenphänologischen Parametersätze unter Berücksichtigung der veränderten bodenphysikalischen Gegebenheiten für jeden Abschnitt erneut angepaßt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich mit Hilfe des WaSiM-ETH-Modellpakets selbst im meso- bis mikroskalem Raum komplizierte hydrologische Systeme

erfassen lassen, die stark durch Bewässerung beeinflusst werden. Bei der modellhaften Beschreibung des Fließverhaltens und der Wasserhaushaltsbilanzierung für das Untersuchungsgebiet Khet werden mit den drei vorgestellten Szenarien unterschiedliche klimatische Jahreszeiten betrachtet (Hauptmonsun, Postmonsun und Trockenzeit). Da kein lineares Abflußverhalten vorliegt, ermöglicht nur die Modellkonfiguration auf Grundlage des RICHARDS-Ansatzes eine angemessene Berücksichtigung des externen Zulaufs bzw. der Bewässerungsentnahmen an verschiedenen Feldableitungen. Zur Modellierung des Fließverhaltens im Einzugsgebiet reicht aber eine Minimalanforderung mit den zwei wesentlichen Modellkomponenten nach PENMAN-MONTEITH und RICHARDS nicht aus. Ohne das zusätzliche Bewässerungsmodul und das Aktivieren einer Überstaufunktion innerhalb des Bodenmoduls läßt sich das tatsächliche Abflußverhalten nicht reproduzieren.

Die simulierten Szenarien vermitteln einen glaubwürdigen Eindruck über den Verbleib und die Verweilzeit des Wasserinputs im Einzugsgebiet. Die Wasserhaushaltsbilanzierungen ermöglichen, den Anteil des Bewässerungswassers zu definieren und verdeutlichen den gesamten Umsatz im Wasserhaushalt (s. Tab. 7.6). Die ermittelten Mengenangaben über den Bewässerungswasserverbrauch erscheinen im Vergleich zu FAO-Richtwerten (DOORENBOS & KASSAM 1979) vertretbar. Das WaSiM-ETH-Modell kann somit bei ausreichender Datenbasis Bewässerungspläne erstellen und den Bewässerungswirkungsgrad optimieren helfen. Im Rahmen des IPMS-Projekts kann aufgezeigt werden, daß mit modelltechnischen Hilfsmitteln die Dynamik der natürlichen Prozesse im Wasserkreislauf untersucht werden kann und die gewonnenen Erkenntnisse zur Ausarbeitung nachhaltiger ökologischer Maßnahmen für das IPMS genutzt werden können. Die Modellergebnisse werden neben üblichen Output-Diagrammen zusätzlich mittels GIS-gestützter Karten visualisiert, indem unterschiedliche thematische Summen- oder Mittelwertgrids für jedes einzelne Szenario in Arc/View ausgegeben werden (Bsp. s. A 7.1 und A 7.2). Je nach Bedarf können kritische oder erforderliche Zeitintervalle gewählt werden und helfen dem Betrachter sensible Gebiete im Einzugsgebiet zu lokalisieren und notwendige lokale Maßnahmenpläne z.B. Landnutzungsplanung zu entwickeln. Mit einer abschließenden Beurteilung skizziert die Tab. 7.7, in wieweit der Modellansatz WaSiM-ETH zur Beschreibung des Khet-Einzugsgebiets geeignet ist, wobei offensichtliche Vor- und Nachteile im Bezug auf das spezielle Anwendungsbeispiel hervorgehoben werden.

Ausblick

Ein Einsatz des Modellsystems WaSiM-ETH in landnutzungsbezogenen Planungsbereichen und somit auch im Pestizidmanagement ist denkbar. Die Modellanwendung demonstriert neue WaSiM-Erkenntnisse in der Bewässerungsmodellierung im mesoskalem Raum, die sich in dieser Konstellation für terrassierte Einzugsgebiete bewährt haben. Die Untersuchung wirft u.a. die Frage auf, wie Starkregenereignisse und deren Intensitätsverläufe Einfluß auf das Makroporengefüge besitzen. Hierbei wäre zu prüfen, ob Verschlämmungen lokale Veränderungen in der Leitfähigkeit auslösen können, wobei detailliertere Felduntersuchungen zur Aufnahme- und Entleerungskapazität sowie zum Tiefenausmaß des Makroporensystems mehr Aufschluß über bevorzugter Fließwege geben könnten. In diesem Zusammenhang würde beispielsweise die von NIEHOFF (2001) neu entwickelte WaSiM-ETH Modell-erweiterung zur Berücksichtigung des Makroporenspeichers oder von Verschlämmungen Anreiz für weitere Forschungsoptionen bieten. Eine optimale Modellausnutzung kann zukünftig auch durch die Komponente des gelösten Bodenwassertransportmoduls erreicht werden. Dieser weitere Forschungsbedarf hinsichtlich des Stofftransportes im Boden könnte

dann nur im interdisziplinären Austausch gesehen werden und würde gleichzeitig einen Schnittpunkt auf der hydrologischen und agroökologischen sowie der ökotoxikologischen Arbeitsebene aufzeigen. Voraussetzung ist die Fortführung des IPMS-Projekts und die Bereitstellung detaillierterer Daten. So könnten dann die Ergebnisse von Simulationsberechnungen im Sinne eines verstärkten Gewässerschutzes berücksichtigt werden. Damit böte sich eine sinnvolle Verknüpfung zwischen der ökologisch ausgerichteten Grundlagenforschung und dem planungsorientierten Forschungsansatz zur Entwicklung eines richtungsweisenden Regelwerks für nachhaltige Entwicklung eines integrierten Pestizidmanagements an. Die Erstellung von Karten zur Kennzeichnung sensibler Anbauflächen, gefährdeter hydrologischer Systeme oder tolerierbarer Pestizidgehalte könnten den örtlichen Entscheidungsträgern in der Landwirtschaft wertvolle Hinweise in Bezug auf bedachten und angemessenen Pflanzenschutzumgang liefern.

Tabelle 7.7 Beurteilung der Modelltauglichkeit
Table 7.7 Assessment of model suitability

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Das Modell WaSiM-ETH ist grundsätzlich für die Einzugsgebietsmodellierung des Khet-Gebietes geeignet. • Das Modell WaSiM-ETH ermöglicht mit relativ geringer Inputinformation realitätsgerechte Ergebnisse zu erzielen. • Die Dynamik der natürlichen Prozesse im Wasserkreislauf können untersucht und annähernd beschrieben werden. • Die Modellanwendung demonstriert neue WaSiM-Erkenntnisse in der Bewässerungsmodellierung im meso- bis mikroskalen Raum, die sich in dieser Konstellation für terrassierte Einzugsgebiete bewährt haben. • Das WaSiM-ETH-Modell kann Bewässerungspläne erstellen und den Bewässerungswirkungsgrad optimieren. • Die Anwendung eines Einheitsboden als Modellgrundlage ist durchaus realistisch. • Die Simulationsergebnisse erzielen gute Bestimmtheitsmaße. • Unsicherheiten in den Ergebnissen werden nicht in der Modellumsetzung gesehen, sondern inadäquaten Eingangsdaten bzw. einzelnen Skalentransfers zugeschrieben. • Der Einsatz des Modellsystems WaSiM-ETH in landnutzungsbezogenen Planungsbereichen und somit auch im Pestizidmanagement ist denkbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine minimale Moduleinstellung für das komplexe hydrologische System ist für das Anwendungsbeispiel nicht anwendbar • Parameter reagieren auf kleine Modelleinzugsgebiete zunehmend labil, welches nur durch erneute Parameteranpassung und kürzere Simulationsabschnitte kompensiert werden kann. • Das Modell WaSiM-ETH kann nur Bewässerung modellieren, wenn die Beschaffenheit des Grundwasserkörpers genügend bekannt ist. • Als besonders kritisch wird die Beschreibung des hochvariablen schwebenden Grundwasserleiters angesehen, denn die Kenntnis der Randbedingung im Untergrund ist für die Bewässerungsmodellierung unumgänglich. • Der externe Kanal (INPUT) ist für die Modellierung des tatsächlichen Systemverhaltens ungenügend diskretisiert. • Die vorliegende Datengrundlage der Verdunstung läßt keine Verifizierung zu, welches zur Folge hat, daß die Wasserhaushaltsbilanzierung nur Leitwerte vermitteln kann. • Sehr aufwendige phänologische Parameterermittlung gemäß zeitechter Übereinstimmung • TANALYS verkleinert bei gröbere Gridaggregation EZG sowie Bewässerungsflächen • Matrixfluß ist derzeit modelltechnisch nicht erfaßbar

8 Zusammenfassung

Diese Studie untersucht und beschreibt ein hydrologisches System des Einzugsgebietes in Nepal. Dazu wird ein hydrologisches Modell namens WaSim-ETH benutzt. Die Untersuchung ist als Teilkomponente im Rahmen des IPMS-Projekts eingebettet und auf eine dreijährige Laufzeit begrenzt.

Das gewählte Repräsentativgebiet bildet eine hydrologische Untereinheit innerhalb des Jhikhu Khola Einzugsgebietes, 50 km östlich von Kathmandu. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von ca. 10 ha und die Höhenlagen erstrecken sich zwischen 870-950 m ü.NN. Die lokalen Witterungsbedingungen werden vom wechselfeuchten Monsunklima geprägt, wobei die Trockenzeit von Oktober bis Mai anhält.

Für die Untersuchung wurde ein geeignetes Wassereinzugsgebietsmodell gewählt. Mit dem Modell WaSiM-ETH-Zürich (SCHULLA & JASPER 1999) können zwei alternative deterministische Modellkonzepte genutzt werden (RICHARDS-Gleichung und TOPMODEL-Ansatz). Beide Prozeßbeschreibungen erlauben eine temporale und flächen- bzw. raumdeckenden Diskretisierung. Im Gegensatz zum konzeptuellen Ansatz zeigt der prozeßorientierte, physikalisch basierte Ansatz geeignetere Voraussetzungen für die spezielle Modellumsetzung, da das Abflußverhalten durch Bewässerungsmaßnahmen beeinflusst wird und somit nicht linear reagiert.

Die Ausgangssituation gibt eine eingeschränkte Datengrundlage vor. Daher stellt sich die Frage, wie genau und umfangreich eine angemessene Datenbereitstellung für das zu untersuchende Objekt zu sein hat, um die Komplexität des hydrologischen Systems realistisch zu beschreiben und eine angemessene Annäherung durch Einzugsgebietsmodellierung zu erreichen.

Bedingt durch die zeitlichen Projektrahmenbedingungen, konnten einige Daten während der Kampagne nicht erhoben werden. Daher kann sich das Modellergebnis nur auf begrenzte Punktmessungen stützen. Probleme bei Evaluierungen in fernab gelegenen Projektgebieten sind in Fachkreisen bekannt (z.B. Diskussion zwischen BEVEN 1996 und REFSGAARD & ABBOT 1996; BLÖSCHL & SIVAPELAN 1995, WOOD et al. 1990 u.a.). In der Studie wird gezeigt, wie notwendig es unter diesen Schwierigkeiten ist, Strategien zu entwickeln, die helfen können Informationslücken mit Variablen und Parametern auszufüllen, um damit annähernd Datenäquivalenz zu schaffen. Während der Modellanwendung wird geprüft, in wie weit Auswirkungen verschiedenartiger Skalenmaßstäbe in den Ausgangsvariablen, aber auch in der Parametrisierung, das Modellergebnis beeinflussen. Ferner werden die Ermittlungen von Zustandsvariablen und Systemparametern und deren Verlässlichkeit für den Modelloutput mit möglichen Restunsicherheiten beurteilt und diskutiert.

Es wird beschrieben, wie während des Preprozessings unterschiedliche Zustandsvariablen erfaßt und aufbereitet werden. Das wird anhand zwei grundsätzlich unterschiedlicher Inputkategorien aufgezeigt, die sich durch ihre Raum- und Zeitdomänen unterscheiden. Die räumlich verteilte Information wird durch die Gebietscharakteristik des Einzugsgebietes beschrieben (*DHM*, Boden- und Landnutzung) und fließt als GIS-unterstütztes Grid in das Modell ein. Die zeitliche Datenkategorie beschreibt meteorologische oder hydrologische Prozesse, die in Zeitskalen gemessen und betrachtete werden.

Die Umsetzung der Datenbereitstellung für räumliche Daten geschah durch Feldbefragung, Landnutzungskartierung und Luftbildinterpretation. Erstellt wurden Bodenkarten aus räumlichen Strukturanalysen, die sich von punktuellen Stützstellen ableiten ließen (Texturansprache aus

Handbohrungen). Diese Informationen wurden in Rasterkarten transformiert, georeferenziert und aggregiert.

Anschließend wurden mittels speziellen Hilfsprozeduren (*help-tool* TANALYS) auf Basis des digitalen Höhenmodells (*DHM*) eine Reihe modellrelevanter Rasterkarten erarbeitet. Das Hilfsmodul TANALYS extrahiert beispielsweise das Flußnetzsystem und generiert darüber hinaus weitere geomorphologische Faktoren in Rasterkarten mit hydrologischer Relevanz (Neigung, Exposition, Fließrichtung, . . .). Weiterhin ermöglicht dieses Verfahren während des Preprozessings alternative räumliche Diskretisierungen zu wählen und festzulegen (Rastermaßstab).

Für die fehlenden zeitlichen Informationen dienten zur Datenbereitstellung Maßnahmen, für die Referenzgebiet mit hydrologischer Ähnlichkeit herangezogen wurden. Geostatistische Prüfverfahren wurden angewandt, um eventuelle Datenlücken aufzufindig zu machen, sie zu ersetzen oder Ungenauigkeiten in Modellergebnissen quantitativ abzuschätzen. Generell wird die temporale Modelldiskretisierung durch kennzeichnende Prozeßverläufe im Einzugsgebiet vorbestimmt. Im Anwendungsbeispiel bestimmt die aufgenommene Zeitdiskretisierung eines externen Kanalzulaufs den zeitlichen Modellmaßstab, da dieser den stärksten Einfluß auf das Abflußgeschehen und somit auf das gesamte Modellergebnis ausübt.

In der Bodenwasserhaushalts- und Einzugsgebietsmodellierung spielen die vertikalen Prozesse des Feuchteausstausches im Boden eine entscheidende Rolle. Die Berechnung des Fließverhaltens von Wasser bedarf daher genauester Kenntnis der lokalen bodenphysikalischen Eigenschaften (gesättigte und ungesättigte hydr. Leitfähigkeit, Wasser-Retentions-Kurve). Zur Beschreibung dieser Eigenschaften und Bestimmung der Parameter gibt es methodisch unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten, wobei die Pedotransferfunktion von SCHAAP (1999) implementiert wurde. Der Versuch wurde unternommen äquivalente pflanzenphänologische Parameter mittels Übertragungsfunktionen abzuleiten (LAI, Bedeckungsgrad, . . .), sofern diese nicht als aktuell gemessene Daten zur Verfügung standen (van KEULEN 1986; van HEEMST 1986).

Das genutzte Modellpaket WaSiM-ETH bietet mehrere Optionen, die durch modulare Konfiguration und variable Raum-Zeit-Diskretisierung abgearbeitet werden können. Mittels bestmöglicher Modulkombinationen wurden selbst komplizierte hydrologische Systeme reproduzierbar, die, wie im vorgestellten Beispiel, durch Bewässerung stark beeinflusst werden. Die Untersuchung zeigt, daß der Einsatz des Modellsystems WaSiM-ETH in landnutzungsbezogenen Planungsbereichen und somit auch im Pestizidmanagement denkbar ist. Die Modellanwendung hilft das Wirkungsgefüge des kleinen hydrologischen Systems zu verstehen. Aspekte des Oberflächenabflusses, der Verdunstung und der Bodenwasserbilanz konnten beschrieben und in thematische Karten visualisiert werden (GIS/ArcView). Trotz einzelner Skalentransferprobleme, wurden drei klimatisch unterschiedliche Szenarien simuliert (Hauptmonsun, Postmonsun und Trockenzeit). Sie vermitteln einen realistischen Eindruck über den Verbleib und die Verweilzeit des Wassereintrags im Einzugsgebiet. Die daraufhin abgeleiteten Wasserhaushaltsbilanzierungen ermöglichen den Anteil des Bewässerungswassers zu definieren und verdeutlichen den gesamten Umsatz im Wasserhaushalt. Hierbei demonstriert die Bewässerungsmodellierung neue WaSiM-Erkenntnisse, die sich in dieser Konstellation für terrassierte Einzugsgebiete bewähren konnten.

Der derzeitige Kenntnisstand über Bodenmatrix und Grundwasserkörper veranlaßt bei der bestehenden Modellumsetzungskapazität potentielle Makroporensysteme mit schneller Tiefenversickerung zu vernachlässigen, wodurch bei dieser Konfiguration unbedeutende Grundwasserbelastung durch wassergebundene Schadstoffe ermittelt wurde. Die derzeitige Modellgenauigkeit ist somit von den gegebenen Projektrahmenbedingungen abhängig, die durch die Projektkonzeption festgelegt wurden. Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen sind als Leitwerte zu betrachten. Sie können aber dennoch im Sinne eines verstärkten Gewässerschutzes berücksichtigt werden. Damit böte sich eine sinnvolle Verknüpfung zwischen der ökologisch

ausgerichteten Grundlagenforschung und dem planungsorientierten Forschungsansatz zur Entwicklung eines richtungsweisenden Regelwerks für nachhaltige Entwicklung eines integrierten Pestizidmanagements an. In Bezug auf das IPMS-Projekt ist somit ein Beitrag zur Analyse der Umweltverträglichkeit und zur Findung nachhaltiger Maßnahmen geleistet worden.

8.1 Summary

The aim of this study was to understand the hydrological behaviour of a small experimental catchment in the middle mountains of Nepal, with the help of computational tools like hydrological modelling. The whole research is embedded in the framework of the IPMS-project (Environmental risk of pesticides and sustainable development of **I**ntegrated **P**est **M**anagement **S**ystem for mountain areas of developing countries considering socio-economic conditions and taking Middle Mountains, Central Nepal), with a duration of three years.

The investigation area was a close sub-unit within the Jhikhu Khola catchment, 50 km east of Kathmandu. The small catchment covered a basin area of ca. 10 ha, the elevation ranged from 850-950 m a.s.l.. The actual weather condition is subject to a monsoon climate with extensive dry season from October to May.

In order to assess the suitability of a certain model structure to solve this particular problem, the use of a semi-distributed deterministic model with modular structure is advisable. With the model WaSiM-ETH-Zürich (SCHULLA & JASPER 1999) two alternative approaches could be applied (RICHARDS-equation or TOPMODEL-approach). Both process descriptions allow spatial discretisation. In contrast to the lumped conceptual code concepts, the physically based distributed code better serves the prerequisite for the realisation of this given specific catchment modelling (system operation) because of non-linear runoff behaviour of the irrigated catchment.

Since the input data basis was restricted due to the initial project conditions following questions were analysed. How may the data acquisition of the complex environmental system under study be adequately approximated to the catchment modelling, regarding the vague description of relevant hydrological data sets and parameters?

The investigation time during this project campaign was limited, therefore not all aspects of data acquisition could be analysed exhaustively. This problem is likely to arise in remote areas, resulting in parameter errors from an inability to represent spatial distributions on the basis of a limited number of point measurements. These basic problems of data acquisition, parameter estimation and upscaling are well known (s. BEVEN 1996; REFSGAARD & ABBOT 1996; BLÖSCHL & SIVAPELAN 1995, WOOD et al. 1990 and others). Some examples in this study show also the difficulties in determining physically-based parameters, including soil properties or soil hydraulic conductivity, canopy resistance and effective root zone depth, plant density or vegetation cover. This creates the necessity to look for alternative strategies to compensate for information gaps with reasonable data to obtain a certain kind of equivalence. Therefore the present research is also an attempt to investigate the effects of scale on hydrological parameterisation (temporal and spatial variability) and its quantification.

The collection and editing by pre-processing of different sets of input-data is described. This is demonstrated on two main types of data categories for the internal simulation. The first category comprises the spatially distributed data sets, where the information is transformed into a grid (GIS overlays). This type of data set is temporally invariant and describes the investigation area in a dimensional way (digital elevation model/DEM, soil and land use grid map). The second category comprises temporal information, collected during certain time periods. In most cases the meteorological or hydrological observation and/or recording takes place only at a few selected points.

For the first data category converted into grid-based spatial data sources, geo-referenced aerial photographs were utilised and transformed. This information was subsequently interpreted and assigned to land use classification by mapping out the fields including field enquires. In case of soil type mapping, information about its basin characteristics came from point-scale measurements and was approximated by the help of geostatistical framework and transmission tools, to describe soil heterogeneity. In this way a linkage across scales was done by desegregation.

Thereafter the special help-tool program TANALYS was used to derive maps with hydrological relevance. TANALYS automatically extracts hydrological properties of catchments from the digital elevation model. Apart from this topographic analyses the program also allows to determine alternative spatial discretisation.

For the second category comprising the temporal information, an attempt was carried out by regionalisation. Hydrological similarity was chosen in adjacent locations (small catchments) if data gaps appeared. Distributing information over space or time invariantly involves some sort of hydrological statistics and their modulation, interpolation and surrogating. The temporal resolution of the hydrological modelling is normally given by the size of the catchment itself. In the present investigated area a very rapid catchment response was observed (rainstorm runoff event), therefore a short time scale of simulation was desirable. But the main influencing component was an external irrigation canal, which had a decisive factor on the discharge behaviour. Under this circumstance the temporal discretisation depended on the measurement resolution of that canal intake.

The calculation of water flow requires the knowledge of various soil hydraulic parameters such as saturated and unsaturated hydraulic conductivity and water retention curves, as well as the determination of boundary conditions like prediction of evapotranspiration rates and soil suction at certain depth. A broad array of methods exists to determine soil hydraulic properties. Pedotransfer functions (PTFs) by SCHAAP (1999) were successfully employed for adequately parameterisation. The parameter estimation due to plant physiology (leave area index/LAI, soil cover) was done by equivalent data transformation approaches (van KEULEN 1986; van HEEMST 1986).

The presented model WaSiM-ETH allows various options regarding module parts, algorithms and variable time scales. According to required module configuration the approaches gives an acceptable representation of the complicate hydrologic system, which in this case is influenced by both irrigation and external canal water supply. As the present investigation demonstrates the hydrological catchment simulation model WaSiM-ETH is valid, making it an effective and practical tool in planning and decision making with regard to land use practices and integrated pesticide management. The application helps to understand the scaling behaviour of catchment response. Finally, aspects of surface runoff and water flow as well as evaporation and soil water balance can be approximately described and be further transformed into thematic maps (GIS/ArcView). Despite imprecise input information, scale complexity, non-linearity and stochasticity, three different climatic scenarios were simulated (monsoon, post-monsoon and dry season). They conveyed credible or realistic information about inherent water fluxes and their temporal distribution or fate within the water cycle. The water balance thus derived allows to assess irrigation water requirements and finally clarifies the total water consumption in the whole hydrological system. In this context the application of a newly developed irrigation module was tested and its results presented.

The actual limited knowledge status of the target area concerning soil matrix and groundwater conditions leads to neglect preferential flow. For the moment this results in insignificant groundwater recharge pollution through potential water-bound pesticide transport. How well the model actually reflects reality depends on the boundary conditions of the project frame.

Nevertheless, the simulation results from this study could be used for the prevention of water pollution. This would be a useful link with applied research and planning oriented approaches to produce a knowledge-based rule and expert system available for efficient or sustainable pesticide reduction measures. In the context of the IPMS-project, it will be a contribution to integrated environmental compatibility and sustainability measures in Nepalese agriculture.

9 Literatur

- Abbot, M.B. & Refsgaard, J.Ch. (1996)
Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library 313 p.
- Abschlußbericht der Landschaftszonen (1993) unveröffentlicht
Exkursion nach Nepal vom 17.3- 13.4.93; Leitung A. Herrmann, TU Braunschweig, Fachbereich Geographie und Geoökologie
- AG Bodenkundliche Kartieranleitung (1994)
4.Aufl.; 392 p. Hannover
- Apel, H. (1988)
Feasibility study of development of a decision support system for integrated pesticide management by means of fuzzy logic and expert knowledge in developing country with an nepali agro-ecosystem as an example. Diploma Thesis Inst. of geography and geocology TU-Braunschweig
- Arnold, A. (1985)
Agrargeographie. UTB Schöning /Paderborn
- Baker, S.L. & Gyawali, B. K. (1994)
Promoting Proper Pesticide Use in Nepal. Research Report Series No. 28. HMG Ministry of Agriculture/Winrock International Policy Analysis in Agriculture and Related Resources Management, 55p.
- Baumgarten, A. & Liebscher, H.J (1990)
Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie Bd.1; Gebr. Borntraeger Berlin / Stuttgart
- Bäumler, R. & Zech, W. (1994)
Soils of high mountain region of Eastern Nepal: classification, distribution and soil forming processes. In: Catena 22 85-103
- Baveye, P & Boast, CH.W. (1999)
Physical Scales and Spatial Predictability of Transport Processes in the Environment. pp. 261-280. In: Non-Point Source Pollution in Vadose Zone Editor: D.L. Crowin, K. Loague and T.R. Ellsworth, Am. Geophys. Union Washington, DC
- Becker, A. & Serban, P. (1990)
Hydrological Models for Water-Resources Systems Design and Operation. In WHO Operational Hydrology report No. 34, WHO-No 740
- Benecke, P. (1992)
Vorhersagbarkeit der Wasserbindungs- und der Wasserleitfähigkeitsfunktion an bodenkundlichen Substraten. In: Regionalisierung in der Hydrologie. DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft Mtt. XI der Senatskommission f. Wasserforschung; pp. 221-239
- Bergström, S. (1995)
The HBV Model. In: Watershed Modelling In: Computer Models of Watershed Hydrology Edt.: Singh, V.P pp. 443-479.
- Bericht zur Landschaftszonen / Nepal (1999) unveröffentlicht
Exkursion vom 3.9.- 1.10.99; Leitung A. Herrmann, TU Braunschweig, Fachbereich Geographie und Geoökologie
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979)
A physical based variable contribution area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., 24 (1); pp. 43-69
- Beven, K.J. (1985)
Distributed Models. In: Hydrological Forecasting; pp. 405-435 Editor Anderson, M.G. & Burt, T.P

- Beven, K.J. (1996)
A Discussion of Distributed Hydrological Modelling. In: Abbot, M.B et al 1969 (Eds.), Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology library Chap. 13A and 13C
- Beven, K.J. (1996)
A discussion of distributed modelling, Chapter 13A, in: J.-C. Refsgaard and M.B. Abott (Eds.) Distributed Hydrological Modelling, Kluwer, Dordrecht; pp. 255-278
- Beven, K.J. (2000)
Rainfall-Runoff Modelling. The Primer. John Wiley & Sons, LTD p. 359
- Beven, K.J. (2001)
How far can we go in distributed hydrological modelling? Hydrology & Earth, System Science 5, 1-12
- Beven, K.J.; Lamp, R.; Quinn, P.; Romanowicz, R. and Freer, J. (1995)
TOPMODEL. In: Computer Models of Watershed Hydrology. Editor: V.P. Sing; pp. 627-668
- Bierkens, M.F.D.; Finke, P.A. and de Willigen, P. (2000)
Upscaling and Downscaling Methods for Environmental Research. Development in Plant and Soil Science. Kluwer Academic Publishers, Vol. 88; 190 p.
- Bill, R. (1999)
Grundlagen der Geo-Informationssysteme Bd. 1+2 2. Aufl. Wiechmann-Verlag Heidelberg
- Blackie, J.R. & Eeles, C.W.O. (1985)
Limped Catchment Models. In: Hydrological Forecasting, pp. 311-345; Editor Anderson M.G. & Burt, T.P
- Blöschl, G. & M. Sivapelan (1995)
Scale issues in hydrological modelling: A review. Hydrological Processes Vol. 9; pp. 251-290
- Bork, H.R. (1992)
Regionalisierung bodenhydrologischer Parameter und Zustandsvariablen. In: Regionalisierung in der Hydrologie. DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft Mtt. XI der Senatskommission f. Wasserforschung; pp. 201-220
- Bormann, H; B. Diekkrüger & C.H. Renschler (1999)
Regionalization concept for the prediction of large-scale water flux In: Regionalization in Hydrology IAHS Publ. No. 254; pp. 13-22
- Brakensiek, D.J.; Rawls, W.J. & Stephenson, G.R. (1984)
Modified SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. ASAE Paper; pp. 84-203 St. Joseph, MI
- Bronstert, A. & Katzenmaier, D. (2001)
The role of infiltration conditions on storm runoff generation at the hillslope and lower meso-scale. In: Leibundgut, Ch., Uhlenbrook, S. & McDonnell Proceedings of International Workshop on Runoff Generation and Implementation for River basin modelling. Freiburger Schriften zur Hydrologie Bd. 13; pp. 55-60
- Bruijnzeel, L.A. & Bremmer, C.N. (1986)
Highland-Lowland interactions in the Ganges Brahmaputra river Basin. ICIMOD Occasional Paper No 11, Kathmandu
- Buchholz, O. (2001)
Hydrologische Modelle. Theorie der Modellierung und Beschreibung. In: Mit. d. Lehrst. u. Inst. f. Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen TH Aachen/Aachen/Mainz
- CEAPRED (2000)
Full Report, Baseline Survey of Pesticides Use at Jhikhu Khola Catchment Area. Centre for Environmental and Agricultural Policy Research. Extension and Development, Bakhundole, Lalitpur, Nepal, 36 p.

- CEAPRED (2001)
Second Economic Survey of Pesticides Use at Jhikhu Khola Catchment Area. Centre for Environmental and Agricultural Policy Research. Extension and Development, Bakhundole, Lalitpur, Nepal, 13pp.
- Clarke, R.T. (1984)
Mathematical models in Hydrology. FAO Irrigation and Drainage Paper No 19; 282 p.; Rome
- Clarke, R.T. (1994)
Statistical Modelling in Hydrology, John Wiley & Sons; 412 p.; Chichester, New York, Brisbane, Toronto Singapore
- Crawford, N.H. & Linsley, E.K. (1964)
A conceptual model of the hydrologic cycle. In: IASH Pub. 63; pp. 573-58
- Daughtry, C.S.T. & Hollinger, S.E. (1984)
Costs of Measuring Leaf Area Index. In: Agronomy Journal Vol. 76; pp. 836- 841
- Doorenbos, J.; Kassam, A.H., (1979)
Yield Response to Water FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995)
Grundlagen der Hydrologie; Verlag für Bauwesen Berlin; 536 p.
- FAO (1989)
Irrigation and Drainage Paper No. 45
- Feddes, R.A.; Kowalik, P.J. & Zaradny, H. (1978)
Simulation of field water use and crop. Simulation Monographs Pudoc. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen
- Fleming, G. (1979)
Deterministic models in hydrology. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 32
- Fread, D.J. (1985)
Channel Rooting. In: Hydrological Forecasting, pp. 437-504; Editor: Anderson M.G. & Burt, T.P
- Gansser, A. (1964)
Geology of the Himalayas. London Interscience; pp. 145-168
- Geyger, E. (1977)
Handbook of Vegetation Science Part XIII Application of Vegetation Science to Gras land Husbandry. Edt.: W. Krause,
- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911)
Studies on Soil Physics: I. The flow of air and water through soil. Journal of Agricultural Science, 4, pp. 1-24
- Gurtz, J. (1988)
Beitrag zu den hydrologischen Grundlagen für die Gewährleistung der gesellschaftlich notwendigen Mehrfachnutzung der Wasserressourcen. Dissertation (B) an der TU-Dresden, Inst. F. Hydrologie und Meteorologie
- Gurtz, J.; Baltenweiler, A.; Lang, H.; Menzel, L and Schulla, J. (1997)
Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluß im Flußgebiet des Rheins. Schlußbericht NFP 31, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; 147 p.
- Haan, C.T., H.P. Johnson & D.L. Brakensiek (1982)
Hydrologic Modelling of small Watersheds. An ASAE Monograph No 5
- Hennings, H. & Müller, U. (1997)
Bewertung von Pedotransferfunktionen zur Schätzung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit In: Mitt. d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft Bd. 85 H. 1; pp. 103-106

- Herrmann, A. (1997)
Environmental risks of pesticides and sustainable development of IPM (Integrated Pesticide Management) for mountain areas of developing countries considering socio-economic conditions and taking Middle Mountains, Central Nepal as an example. Project Proposal; 81 p.; TU-Braunschweig
- Herrmann, A. (1999)
Probleme und Chancen eines multilateralen Forschungskonzepts zur Minderung der Pestizidbelastung der Umwelt durch ein Integriertes Pestizid-Management in Entwicklungsländer am Beispiel Nepal. Interdisziplinäres Kolloquium Instrumente des Umweltschutzes im Wirkungsverbund zum Schwerpunkt "Umwelt als knappes Gut" der Volkswagen-Stiftung
- Herrmann, A. (2002)
Conclusions and Recommendations of the Workshop. In Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 276-279
- Herrmann, A. & Schumann, S. (1999)
Ein Forschungsansatz zu Umweltrisiken von Pestiziden und der nachhaltigen Entwicklung eines Integrierten Pestizid Managements (IPM) unter Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Verhältnisse in Nepal. In: Landschaftsökologie und Umweltforschung Umweltsystemanalyse, Dynamik natürlicher und anthropogener Systeme und ihre Wechselbeziehung. Herausgeber: Flake, M; Seppelt, R u. Söndgerath, D; Tagungsband GEOÖKon'99 der TU-Braunschweig H. 33; pp. 235 – 245
- Herrmann, A. & Schumann, S. (2001)
Collaborative project on Environmental Risks of Pesticides and Development of an Integrated Pesticide Management System (IPMS) in Nepal Considering Socio-economic Conditions: status and perspectives. Proc. Internat. Workshop on Environmental Risk Assessment of Pesticides and Integrated Pesticide Management in Developing Countries Kathmandu 6-9 Nov. 2001. Landschaftsökologie und Umweltforschung 36; pp. 23-28
- Herrmann, A. & Schumann, S. (2002)
Proceedings. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; 281 p.
- Herrmann, A. & Schumann, S. (2002a)
Collaborative project on environmental risk of pesticides and development of an integrated pesticide management system (IPMS) in Nepal considering socio economic conditions: Status and perspectives. In Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 38-48
- Herrmann, A.; Schumann, S.; Neupane, F.P.; Niraula, B.B.; Wiebelt, M.; Khanal, N.R.; Pujara, U, D.S. & Upadhyay, B.P. (2001)
Chances of Protecting Middle Mountains Environments in Central Nepal from Pesticide Misuse Considering socio-economic conditions. Proc. Kathmandu Symp. on the Himalayan Environments: Mountain Sciences and Ecotourism/Biodiversity 24-26 Nov. 2000; pp. 246-260
- ICIMOD (1993)
The role of extreme weather events, mass movements and land use changes in increasing natural hazards
- ICIMOD (1995)
Challenges in Mountain Resource Management in Nepal. Processes, Trends and Dynamics in Middle Mountain Watershed. Editor: Schreier, H.; Shah, P.B.; Brown, S. Proceedings of a Workshop held in Kathmandu, Nepal 10-12 April 95. sp. by Int. Devlp. Research Centre IDRC Ottawa, Canada a. Singapore
- ICIMOD (1996)
GIS Database of Key Indicators of Sustainable Mountain Development in Nepal. Mountain Environment and Natural Resources Information Service MENRIS, Kathmandu

- ICIMOD (1998)
Hydrological and Meteorological Data of Jhikhu Khola Watershed, 1997; People and Recourse Dynamics in Mountain Watersheds of Hindu-Kush Himalayas (PARDYP Project), Kathmandu, Nepal
- Interim Report (2000) unveröffentlicht
Environmental risk of pesticides and sustainable development of an Integrated Pesticide Management (IPM) for mountain areas of developing countries considering socio-economic conditions and taking Middle Mountains, Central Nepal as an example. (Az.II/74 093) Institut für Geographie und Geoökologie, Abteilung für Hydrologie und Landschaftsökologie, Technische Universität Braunschweig
- Interim Report (2001) unveröffentlicht
Environmental risks of pesticide system and sustainable development of an Integrated Pesticide Management System (IPMS) for mountain areas of developing countries considering socio-economic conditions and taking Middle Mountains, Central Nepal as an example, (Az. II/74 093) Institut für Geographie und Geoökologie, Abteilung für Hydrologie und Landschaftsökologie, Technische Universität Braunschweig
- ISRIC (1980)
Field Extract of Soil Taxonomy Technical Paper 4 International Soil Reference and Information Centre Wageningen; The Netherlands
- Jothityangkoon, CH.; Sivaplan, M. & Farmer, D.L. (2000)
Process Controls of Water Balance Variability in a Large Semi-Arid catchment: Downward Approach to Hydrological Model development. In: Journal of Hydrology
- Jubelt, R. & Schreiter, P. (1972)
Gesteinsbestimmungsbuch. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig
- Jury, W.A.; Gardener, W.R. & Gardener, W.H. (1991)
Soil Physics, John Willey & Sons. INC.
- Kansakar, S.R.; Pradjapati, S.B. & Pockerel, A.P. (2002)
Hydrological and meteorological components in the Integrated Pesticide Management Project at Jaisidhi Khola, Tiniple. In Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 82- 89
- Kirkby, M. J.; Naden, P. S.; Burt T. P. and Butcher, D. P. (1992)
Computer Simulation in Physical Geography. John Wiley & Sons
- KMK-DVWM (1979)
Regeln zur Wasserwirtschaft. Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit, H. 101
- Kretschmar, R. (1995)
Gesichtspunkte und Beispiele zur Bewässerungsplanung Inst. F. Wasserwirtschaft u Landschaftsökologie der Christian-Albrecht Uni Kiel
- Leibundgut, Ch.; Uhlenbrook, S. & McDonnell (2001)
Proceedings of International Workshop on Runoff Generation and Implementation for River basin modelling. Freiburger Schriften zur Hydrologie Bd. 13
- Leseberg, T. (2000) unveröffentlicht
Erstellung eines Hydrologischen Strukturmodells unter Berücksichtigung hydrologischer Parameter für das Einzugsgebiet Tiniple Khet in Nepal. Studienarbeit der TU-Braunschweig
- Maharjan, P.L. (1988)
The soil survey of Jhikhu Khola watershed area, Central Soil Science Division, National Agricultural Research Centre; Ministry of Agriculture, Khumaltar

- Manandhar, D.N. & Shakya, D.M. (1996)
Climate and Crop of Nepal, Nepal Agricultural Research Council + Swiss Agency f. Development and Co-operation, Nepal
- Meijerink, A.M.J.; De Brower, H.A.M.; Mannaerts, C.M and Valenzuela, C.R. (1994)
Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. ITC / UNESCO Publication No 23 Chapter 6 Digital elevation models and its application; pp. 146-182
- Merz, B.; A. Bardossy & E. J. Plate (1999)
Transition from the point scale to the small catchment scale: exemplified on the Weihebach catchment
In: Regionalization in Hydrology IAHS Publ. No. 254; pp. 23-31
- Molnar, P. (1986)
Das Fundament der Gebirge. Spektrum der Wissenschaft 9/1989
- Monteith, J.L. (1975)
Vegetation and the atmosphere, Vol. 1: Principals. Academic Press, London
- Morgan, R.P.C. (1999)
Bodenerosion und Bodenerhaltung, Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart; 236 p.
- Nemec, J. (1986)
Design and operation of forecasting operating real-time hydrological system (forth); pp. 299-322; In: River flow modelling and forecasting Edited by D.J. Kraijenhoff & J.R. Mull
- Niehoff, D. (2001)
Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation; 144 p.
- Numata, M. (1966)
Vegetation and conservation in Eastern Nepal. Journal College Arts and Science, Chiba University Nat. Sci. 4(4): pp. 559-569
- Olbrisch, H.D. (1974)
Statistische Methoden in der Gewässerkunde und ihre Anwendung . Mitt. No. 5; Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft Rheinisch-Westfälische Techn. Hochschule Aachen; 148 p.
- Panday, S.P.; Tanang, D.B. & Baidya, S.N. (1995)
Soil fertility management and agricultural production issues with respect to the middle mountain region of Nepal in ICIMOD 95 Challenges in Mountain Resource Management in Nepal. Processes, Trends and Dynamics in Middle Mountain Watershed; pp. 41-49
- Penman, H.L. (1948)
Natural evapotranspiration from open water, bar soil and grass. Poroc. Royal Meteorologic Society, London 193 (A) 120-145
- Peschke, G. (1977)
Ein zweistufiges Modell der Infiltration von Regen in geschichtete Böden. Acta Hydrophysica, 22 (1), 39-48
- Piepho, B. (2002)
Evaluation of simulated hydrological behaviour in a small catchment by using the model WASIM. A case study within the IPM-Project in Nepal. Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 142-155
- Plate, E.J. (1992)
Skalen in der Hydrologie zur Definition von Begriffen: In Regionalisierung in der Hydrologie DFG Deutsche Forschungs-Gemeinschaft VCH Mitt. XI der Senatskommission f. Wasserforschung; pp. 33-44
- Plate, E.J. & Duckstein, L. (1990)
Stochastic aspects of water quality modelling for non point sources. Proceedings of International

- Conference on Water Quality modelling in Agricultural non-Point Sources. ED.: D.G. DeCoursey, USDA, Agriculture Research Service; ARS-81. Pt. 2; pp. 631-654
- Pradyumna, P. Karan & W.M. Jenkins (1960)
Nepal - A Cultural and Physical Geography (with 35 Maps). Uni. of Kentucky press, Lexington
- Prasai, A. (2001)
Geomorphologic Processes and Landscape Modification. A case study of Tinpi-subwatershed in Jhiku Khola watershed, Kavrepalanchowk District of Nepal. MA Thesis, Central Dep. of Geography, Tribhuvan University, Kathmandu Nepal
- Pujara, D.P. (2000)
Spatial, structure of agricultural land use and its performance in the Middle Hills of Nepal: a case study of Jaishidihi watershed, Kabhre Planchock district. MA Thesis, Faculty of Humanities and Social Sciences, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal
- Pujara, D.S. & Khanal. N.R (2002)
Use of pesticides in Jashidi sub-catchment, Jhikhu Khola watershed, Middle Mountains in Nepal. In Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 168-177
- Ram Kumar Panday (1995)
Altitude Geography; Himalayan Heights, Challenges and Strategies for Environment and Development
- Rawls, W.J. & Brakensiek, D.L. (1985)
Prediction of Soil Water Properties for Hydrologic Models. In: Proceedings of Symposium on Watershed Management, American Society of Civil Engineering New York
- Refsgaard, J.C. & Storm, B. (1995)
MIKE SHE. In: Watershed Modelling In: Computer Models of Watershed Hydrology Edt.: Singh, V.P pp. 809-846.
- Refsgaard, J.Ch., Storm, B & Abbot, M.B. (1996)
A Discussion of Distributed Hydrological Modelling. In: Abbot, M.B et al 1969, Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library Chap. 13B
- Russo, D. & Dagan, G. (1993)
Water Flow and Solute Transport in Soil. Development and Applications Advanced Series in Agricultural Science 20
- Schaap, M.G. (1999)
Rosetta Version 1.0 USSSL FTP Access
- Schafmeister, M.Th. (1999)
Geostatistik für die hydrologische Praxis; 172 p.; Springer Verlag
- Scheffer / Schachtschabel (1998)
Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Aufl. Ferdinand Enke-Verlag Stuttgart
- Schulla, J. (1997)
Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Züricher Geographische Schriften H. 69. Verlag Geographisches Institut ETH Zürich; 161 p.
- Schulla, J. & K. Jasper, (1999)
Modellbeschreibung WaSiM-ETH, ETH-Zürich; 180 p.
- Schumann, S. (2002)
Fast estimation of pesticide risk potential on groundwater through the use of dye tracer technique. In Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 178-189
- Schumann, S., Hermann, A., (2000)
Multilateral approach of an Integrated Pesticide Management System (IPMS) for sustainable

- agriculture in Nepal. Proc. Wageningen Conf. on Agricultural Effects on Ground and Surface Waters. Research and Policy at the Edge of Science and Society 1-4 Oct. 2000, Vol. Regional Scale Research
- Schumann, S., Hermann, A., Stichler, W. & Prajapati, S.B. (2001)
Tracer hydrological investigations in a small irrigated agricultural basin in Nepal to evaluate environmental risks of pesticides. Proc. XXXI IAH Congress on New Approaches to Characterising Groundwater Flow Munich 10-14 Sept. 2001; Balkema; pp. 189-194
- Schumann, S.; Stichler, W. & Prajapati, S.B. (2002)
Underground water passages and runoff formation pattern in Khet Catchment. In Proc. International Workshop on Environment Risk Assessment and Integrated Pesticide Management in Developing Countries. Landschaftsökologie und Umweltforschung 38; Braunschweig; pp. 190-204
- Shah, P.B. (1995)
Indigenous Agriculture Land and Soil Classification pp. 203-210 in: ICIMOD: Challenges in Mountain Resource Management in Nepal. Processes, Trends and Dynamics in middle mountain Watersheds. Proceedings of a Workshop held in Kathmandu, Nepal 10-12 April 1995. IDRC (Int. Dev. Res. Centre) Ottawa, Canada and Singapore
- Shah, P.B.; G. Nakrimi; B. Shrestha; J.K. Subba; A.R. Pathak; H. Schreiber; S. Brown; M. Carver; G. Kennedy; L. Srivastava (1993)
Mountain Resource Management Project, Nepal Resource dynamics, production and degradation in a middle mountain watershed; integrating Bio-physical and socio-economic conditions in the Jhikhu-Khola watershed with GIS and simulation models. First Annual Report (Phase II) Kathmandu/Vancouver
- Singh, V.P. (1995)
Watershed modelling In: Computer models of Watershed Hydrology; pp. 1-22
- Slabbers, P.J. (1977)
Surface roughness of crops and potential evapotranspiration. Journal of Hydrology 34; pp. 181-191
- Soil Survey Staff (1975)
Soil Taxonomy. Agric. Handbook 436, Washington
- Stanley, S.M. (1995)
Historische Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Tietje, O. & Tapkenhinrichs, M. (1993)
Evaluierung of pedotransfer functions. Soil Sci. Soc. Am. J. 57; pp. 1088-1095
- Van Genuchten, M.Th. (1980)
A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science, Soc. Am. J.; Vol. 44; pp. 892-898
- Van Heemst, H.D.J (1986)
Physiological principles and crop phenology and dry matter distribution. Simulation Monographs Pudoc Wageningen; pp. 13-40
- Van Keulen, H. & Wolf, J. (1986)
Modelling of agriculture production: weather, soil and crops. Simulation Monographs Pudoc Wageningen; 480 p.
- Warrick, A.W.; Vargas-Guzmán, J.A., Mayer, S., Restrepo and Ellsworth, T.R. (1999)
Strategies for Improving Spatial Variability Assessments. In: Assessment of Non-Point-Source Pollution in Vadose Zone. Editors: Crowin et al., Geophysical Monograph Series No. 108; American Geophysical Union, Washington, DC; pp. 93-105
- Weingartner, R. (1999)
Regionalhydrologische Analysen, Grundlagen und Anwendungen. In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz. Nr.37; Bern; 178 p.
- Weischet, W. (1979)
Einführung in die Allgemeine Klimatologie. B.G. Teubner Stuttgart

- Wenkel, K.-O. & Schultz, A. (1999)
 Vom Punkt zur Fläche – Das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus Sicht der Landschaftsmodellierung. pp. 19-42 In: Regionalisierung in der Landschaftsökologie Hrsg.: Steinhar, D.U. & Volk, M.; UFZ-Leipzig-Hale GmbH
- Wessolek, G. & Plagge, R. und König, R. (1991)
 Modellstudien zur Empfindlichkeit der Van Genuchten-Mualem Parameter. In: Mitt. Dt. Bodenkundl. Gesellschaft 66 I; pp. 255-258
- Wood, E.F.; Sivaplan, M. and Beven, K. (1990)
 Similarity and scale in catchment storm response. Review of Geophysics 28, 1; pp. 1-18
- Wymann, S. (1993)
 Land use change and soil fertility status in small watershed in the middle hills of Nepal: Signs of Pressure pp. 189-204. In: B. Messerli; T. Hofer; S. Wymann: Himalayan Environment Pressure – Problems – Processes. Geographica Bernensia; G 38; University of Bern; Switzerland
- Wyss, M. (1993)
 Approach to a regionalization of the Hindu Kush-Himalayan Mountains. pp. 9 – 20 In: B. Messerli; T. Hofer; S. Wymann: Himalayan Environment Pressure – Problems – Processes. Geographica Bernensia; G38; University of Bern; Switzerland

Karten:

- Geological Map of the Himalayas; Scale: 1:2000000 by Gansser, A. (1964)
 Geological Map of Kathmandu area & Central Makhabharat range by Sharan, C.K. (1990)
 Geological Map of Central Nepal; Dep. of Mines and Geology Scale: 1:250000 by Rana, M.N. (1984)
 Soil Map of the World; Vol. VII.2.1; Scale: 1:5 000000 by FAO/UNESCO (1974) UNESCO; Paris

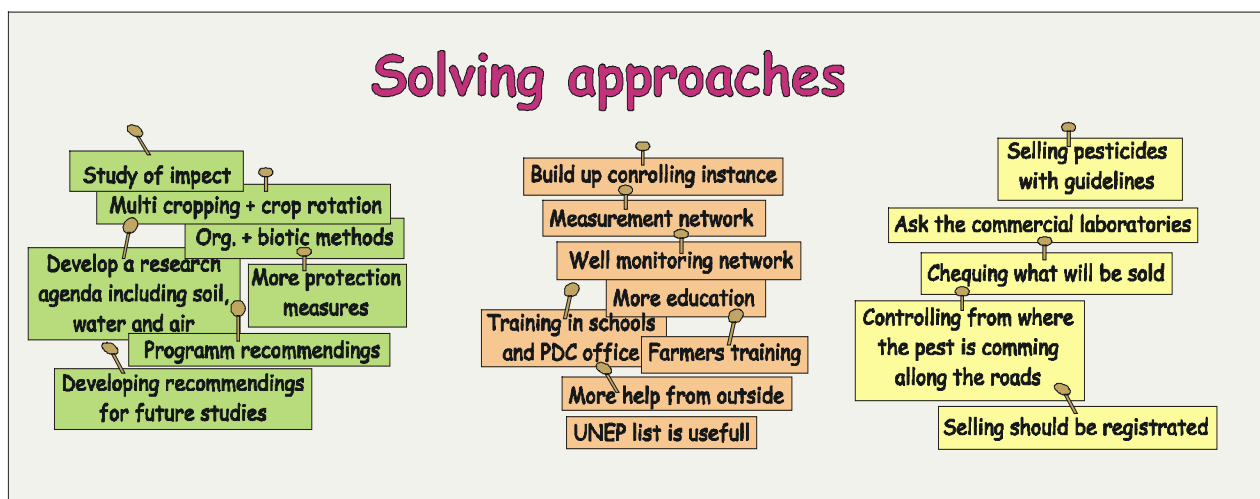
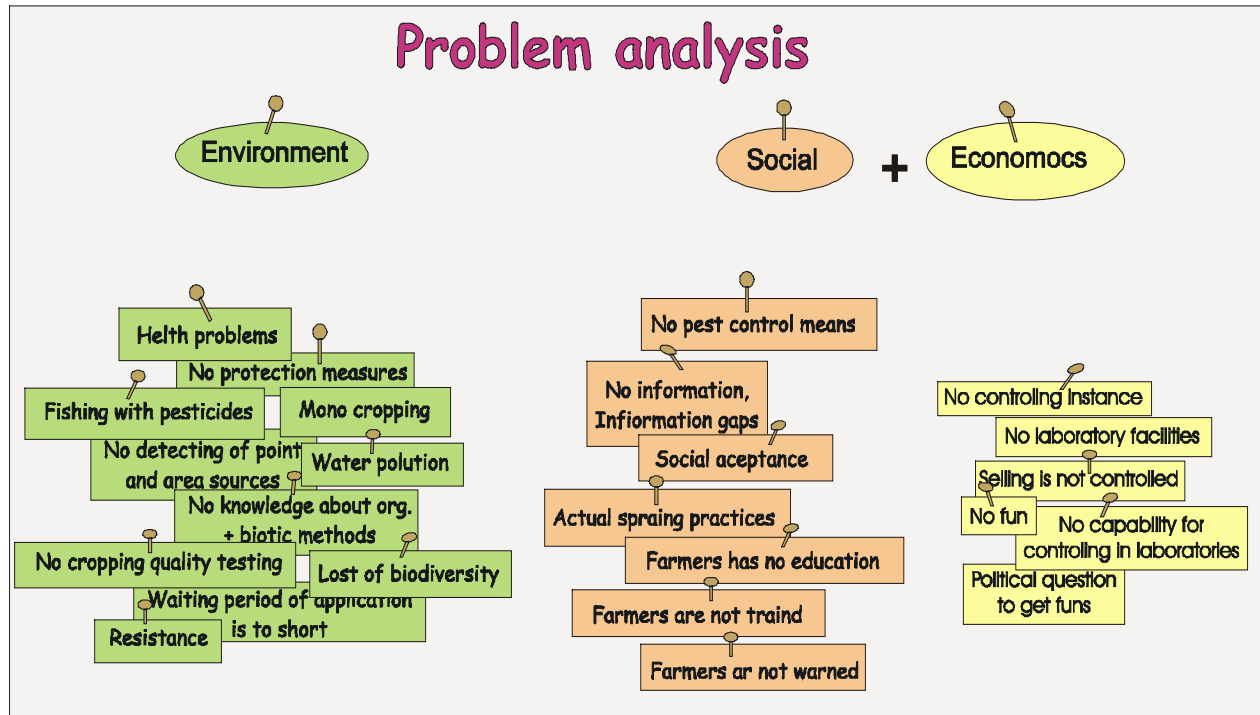
Web-Seiten:

- <http://www.chem.unepch/pops>
<http://www.dorn.org/uni/sls>
<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPP/Pesticid/Code/guide.htm>
<http://www.iac.etz.ch/map-doc/NL7/RaphaelProjekt.htm>
<http://www.icimod.org.sg>
http://www.tu-bs.de/institute/igg/physhyd/forsch/pestizid_projekt.html
http://www.unep.org/unep/per/rmu/catalog/env_heal.htm
<http://www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.HTM>

10 Anhang

Key Problems

Negative side effects of pesticide use



Recommendations

- Promoting the ecological awareness to all person affected
- Point out relevant consequences and/or effects of ecological system on local and regional scale
- Develop a guide-line which includes measures of integrated environmental compatibility and sustainability for the government

► Title of the project	Summary of Objectives / Activities		Objectively Verifiable Indicators	Means / Sources of Verification	Important Assumption
	Primary Aim				
	<ul style="list-style-type: none"> Environmental Risk Assessment of Pesticides and Integrated Pesticide Management in Developing Countries, 		<ul style="list-style-type: none"> The complex problem is met by multilateral and interdisciplinary approach: <ul style="list-style-type: none"> - Scientific and socio-economic components, - Co-operation with Nepalese's governmental and non – governmental institutions 	<ul style="list-style-type: none"> The project has been allocated to the Volkswagen-Stiftung's programme "Environmental Scarcity – Ways of control and Incentives to reduce pollution and waste" The project is based on scientific exchange with AGROOEEK; GSF-HYD; IFW; PHYSHYD; OEKOTOX on German site and CEAPRED; DOA; DHM; ICIMOD; TU-KTM on Nepalese side 	<ul style="list-style-type: none"> General Boundaries <ul style="list-style-type: none"> Extremely packed time frame Local socio-economic boundary conditions <ul style="list-style-type: none"> Security risks during the field work are out of question Availability of logistic, equipment and personnel Scientific and practical co-operation and collaboration Farmers demand are taken in consideration Local environmental boundary conditions <ul style="list-style-type: none"> The selected experimental field site is representing a close hydrological catchment system The location has homogeneous soil conditions Local agronomic boundary conditions <ul style="list-style-type: none"> The field experiments are made on rainfed (bari) and irrigated (khet) land
Partial project purpose	<ul style="list-style-type: none"> Project component "Hydrology" Describing the major physical processes in the individual parts of hydrological cycle 		<ul style="list-style-type: none"> Experimental field site: <ul style="list-style-type: none"> → A close sub-unit within the Jhikhu Khola catchment near Dhulikhel, Kavre Palanchowk District (size 12.7 ha and 10 ha, altitude 860 - 1.100 m a.s.l.), Location: <ul style="list-style-type: none"> → 50 km east of Kathmandu Weather condition: <ul style="list-style-type: none"> → Monsoon climate Installation of measuring & and sampling equipment Constantly data collection and detailed parameter estimation Aerial photographs interpretation Application of a simulation model to a sequences of rainstorm even and to a representative vegetation period 	<ul style="list-style-type: none"> Topographic -, geologic - and soil maps Literature survey Assessment of existing environmental data Regular recording of meteorological data from climate station as well as from the recording gauges, piezometers and other physical measurement equipment Scientific studies and pure research 	<ul style="list-style-type: none"> Local environmental boundary conditions <ul style="list-style-type: none"> The selected experimental field site is representing a close hydrological catchment system The location has homogeneous soil conditions Local agronomic boundary conditions <ul style="list-style-type: none"> The field experiments are made on rainfed (bari) and irrigated (khet) land
Methods	<ul style="list-style-type: none"> Hypothesis development Stock-taking and new In situ tests Pre-processing of grid maps and data sets Process studies through the application of integrated components (PC –tools) Case study Post-processing and visualisation Consequences 		<ul style="list-style-type: none"> Aerial photographs from 1996 Computer based tools <ul style="list-style-type: none"> → WaSiM – ETH Zürich (water balance simulation model) → ARC/INFO (geographic information system) 	<ul style="list-style-type: none"> The application of the chosen simulation model is realistic and is based on physical and numerical description, further it has modular structure and has pre- and post-processing facilities interfaced with GIS 	
Activities	<ul style="list-style-type: none"> Data collection and monitoring Field and lab. experiments (implementation & evaluation) Establishing a demonstration plot on the Horticulture Farm Regionalisation (spatial resolution) Assessment of climatic and hydrologic time series (records) Successively adoption of model comparability, verification, validation and calibration 		<ul style="list-style-type: none"> General data capture and processing Determine relevant data parameters Digitising the base map (DEM - digital elevation model) Extraction of new relevant maps from DEM Adaptation of spatial data sets: aggregation and desegregation (grids) Estimation of crop phenology data by index plants Feeding the model with collected input data and grid maps 	<ul style="list-style-type: none"> Local enquiries Availability of local cropping schedule Interpretation of results through verification calibration validation and give clear statements 	<ul style="list-style-type: none"> The determination of data is conscientious Rule out measuring mistakes The statements of the farmers are credible Data gaps are reconcilable
Results / Output	<ul style="list-style-type: none"> Scientific results and models will be used: <ul style="list-style-type: none"> to reproduce the hydrological behaviour of catchment ... and as: <ul style="list-style-type: none"> a practical tool for planning and decision a foundation of reliable forecasts and risk management a contribution to large scale pesticide management strategies 		<ul style="list-style-type: none"> Active <ul style="list-style-type: none"> To develop guide lines with the help of model scenario development Introduce and support sustainable measures Show the tendency of potential risk ? Contribute to promote the ecological awareness to all person affected Measures integrated environmental compatibility and sustainability in the developed guide-lines 	<ul style="list-style-type: none"> Passive <ul style="list-style-type: none"> Parameters are intended to be physical interpretable After interpolation from data strings as well as from relevant environmental conditions, quantitative flow units on grids time scale can be visualised in partial zones or aggregated form 	<ul style="list-style-type: none"> The hydrologic model will have to be described in simple terms such that interpretation of the results would not tax the ability of user The use of Gis as visual tool facilitate the interpretation and recommendation The comparison shows that the modelling system simulates the hydrological regime with acceptable accuracy

Check list for decision support: Status

Credit	Data basis comments	Status
Landscape complexity:		
- Geomorphologic feature (variation in bedrock, landform; soil type and - depth, elevation, slope, degree of dissection)	<i>complex</i>	<i>high</i>
- Biotic complex (life forms, native vegetation, microbial biota)	<i>complex</i>	
- Disturbances (agriculture i.e. diversity of crops or fallow, water withdrawal, irrigation, windthrow of trees, landslides, fire, floods, drought...)	<i>complex</i>	
Hydrologic systems:		
- Bucket systems (multiple-; parallel-, serial-, single-bucket system)	<i>simple</i>	<i>high</i>
- Linearity or nonlinearity (within year random variability.... inter- or intra-annual)	<i>non-linear</i>	
- Homogeneity or heterogeneity (soil properties)	<i>heterogen</i>	
- Open or closed system	<i>open</i>	
Driving forces:		
- Rules and arguments which are measurable and are causes for effects	<i>available</i>	<i>medium - good</i>
- Variables (physical quantities which can vary freely)	<i>time consuming or difficult to estimate</i>	
(1) + (2) Signature of the environment system: (processes and objectives)		
- Flow duration curve	<i>available</i>	<i>seasonal</i>
- Regime curve (flow characteristics, average flow ...)	<i>yes</i>	
- Water balance	<i>yes</i>	
- Specific parameter (a quantity which is characterising the system)	<i>many</i>	
(3) Spatial resolution:		
- Hill slope scale or catchment scale	<i>catchment scale</i>	<i>small</i>
- Grid size depends on variabilities	<i>10 m</i>	
(4) Feasibility's:		
- Data consistence	<i>available but not the best (gaps)</i>	<i>medium - limited</i>
- Time series of climate and discharge input	<i>short</i>	
- Geostatistics / regionalisation	<i>possible</i>	
- Data available	<i>limited</i>	
- Long-term water balance	<i>not possible</i>	
- Spatial coverage of drilling conducted	<i>Inadequate, time consuming</i>	
- Recourses and requirements, frequencies, dependence, priorities,...	<i>flexible</i>	
(5) Means to measure or to verificate:		
- Data capture due to the driving forces: climate (aridity or humidity), topography, disturbance (natural or anthropogenic)	<i>available</i>	<i>high - good</i>
- Measurement facilities and devices (stream gauge and climate station,)	<i>good</i>	
- PC-tools (simulation models, GIS)	<i>available</i>	
- Spot data (drillings, samplings,...)	<i>some</i>	
- Data linkages (mathematics, stochastic, geostatistics, pedo-transfer function, fuzzy approaches, parameter estimation, sensitivity analysis,...)	<i>possible</i>	
- Templates of the environment system (Thematic maps: land use, topography, soil,...)	<i>many</i>	
(6) Boundaries:		
- Thresholds of action levels (accessibility of place and information, collaboration and/or co-operation)	<i>medium</i>	<i>high - uncertain</i>
- Time frame	<i>short</i>	
- General uncertainties (acts of God)	<i>high</i>	
- of political situation	<i>instability</i>	
Model configuration:		
- Upward or bottom up approach or downward or top-down approach	<i>both</i>	<i>model approach ok</i>
- Lumped or distributed	<i>semi-distributed</i>	

The marks of quality can comprise the availability, feasibility, amount, high or low, large or small, simple or complex (ranking no. from 0 to 1)

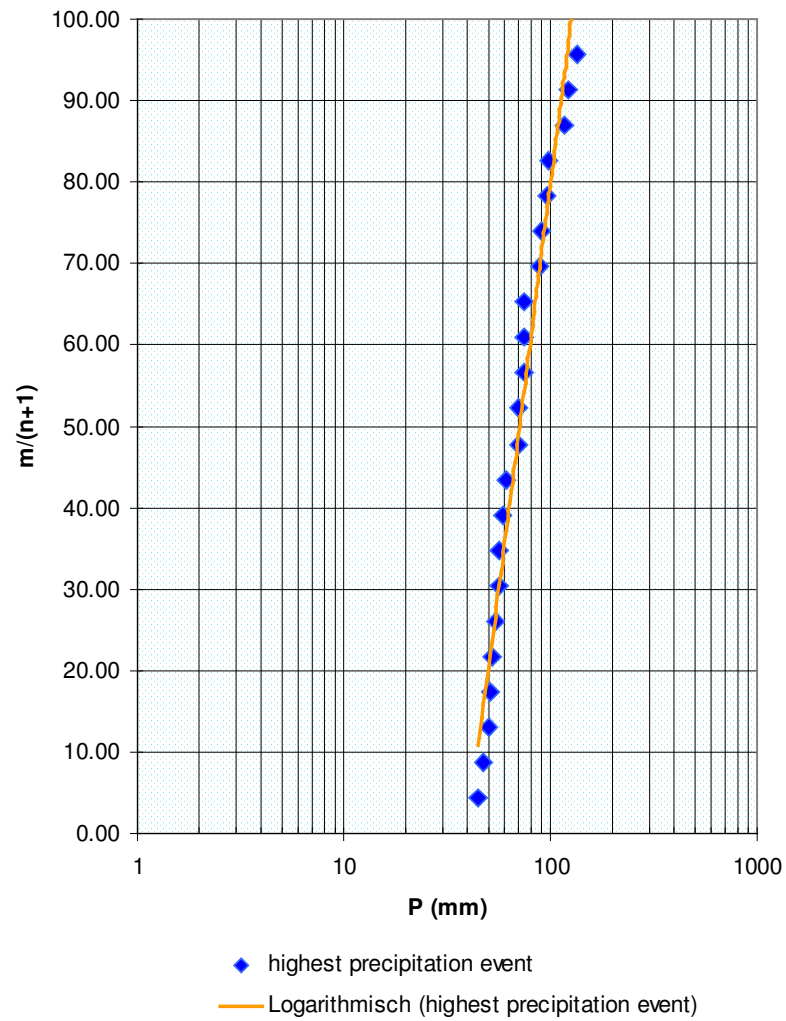


Abbildung A 3.1 Wiederkehrintervall der max. Niederschläge im Referenzgebiet Tamaghat (Beobachtungszeitraum 23 Jahre)
 Figure A 3.1 Determination of the probability max. annual precipitation in Tamaghat (Period of observation 23 years)

Tabelle A 3.2.1 Wasserbilanz für das Khet-Gebiet
Table A 3.2.1 Water balance in Khet

Datum	Precipitation	Input NPAD	N+NPAD	Evaporation	Evaporation	Output NPAK	NPAK	V+NPAK
Feb. 00	2.40	465.45	467.85	165.50	-165.50	130.55	-130.55	-296.05
März. 00	12.70	378.88	391.58	184.40	-184.40	104.44	-104.44	-288.84
April. 00	40.40	127.52	167.92	210.00	-210.00	69.49	-69.49	-279.49
Mai 00	92.10	132.56	224.66	162.90	-162.90	74.24	-74.24	-237.14
Juni 00	120.30	107.19	227.49	149.90	-149.90	103.61	-103.61	-253.51
Juli 00	264.90	190.01	454.91	221.70	-221.70	376.06	-376.06	-597.76
Aug. 00	250.40	162.82	413.22	257.10	-257.10	273.10	-273.10	-530.20
Sept. 00	96.00	94.04	190.04	332.30	-332.30	90.18	-90.18	-422.48
Okt. 00	14.70	215.54	230.24	133.10	-133.10	125.52	-125.52	-258.62
Nov. 00	5.80	282.16	287.96	138.80	-138.80	129.88	-129.88	-268.68
Dez. 00	0.60	252.18	252.78	79.40	-79.40	127.94	-127.94	-207.34
Jan.01	2.70	266.84	269.54	101.80	-101.80	200.47	-200.47	-302.27
Summe	903.00	2675.18	3578.18	2136.90		1805.48		-3942.38

Bilanz	Class A Pan	Class A Pan	V+NPAK	Bilanz
171.80	106.21	-106.21	-236.76	231.09
102.74	117.17	-117.17	-221.61	169.97
-111.57	116.12	-116.12	-185.60	-17.68
-12.48	116.36	-116.36	-190.60	34.06
-26.03	123.67	-123.67	-227.28	0.20
-142.85	165.36	-165.36	-541.42	-86.51
-116.97	152.51	-152.51	-425.60	-12.38
-232.44	186.92	-186.92	-277.10	-87.06
-28.38	74.87	-74.87	-200.39	29.85
19.28	122.74	-122.74	-252.62	35.34
45.44	44.66	-44.66	-172.60	80.17
-32.74	25.74	-25.74	-226.21	43.32
-364.21	1352.31		-3157.79	420.39

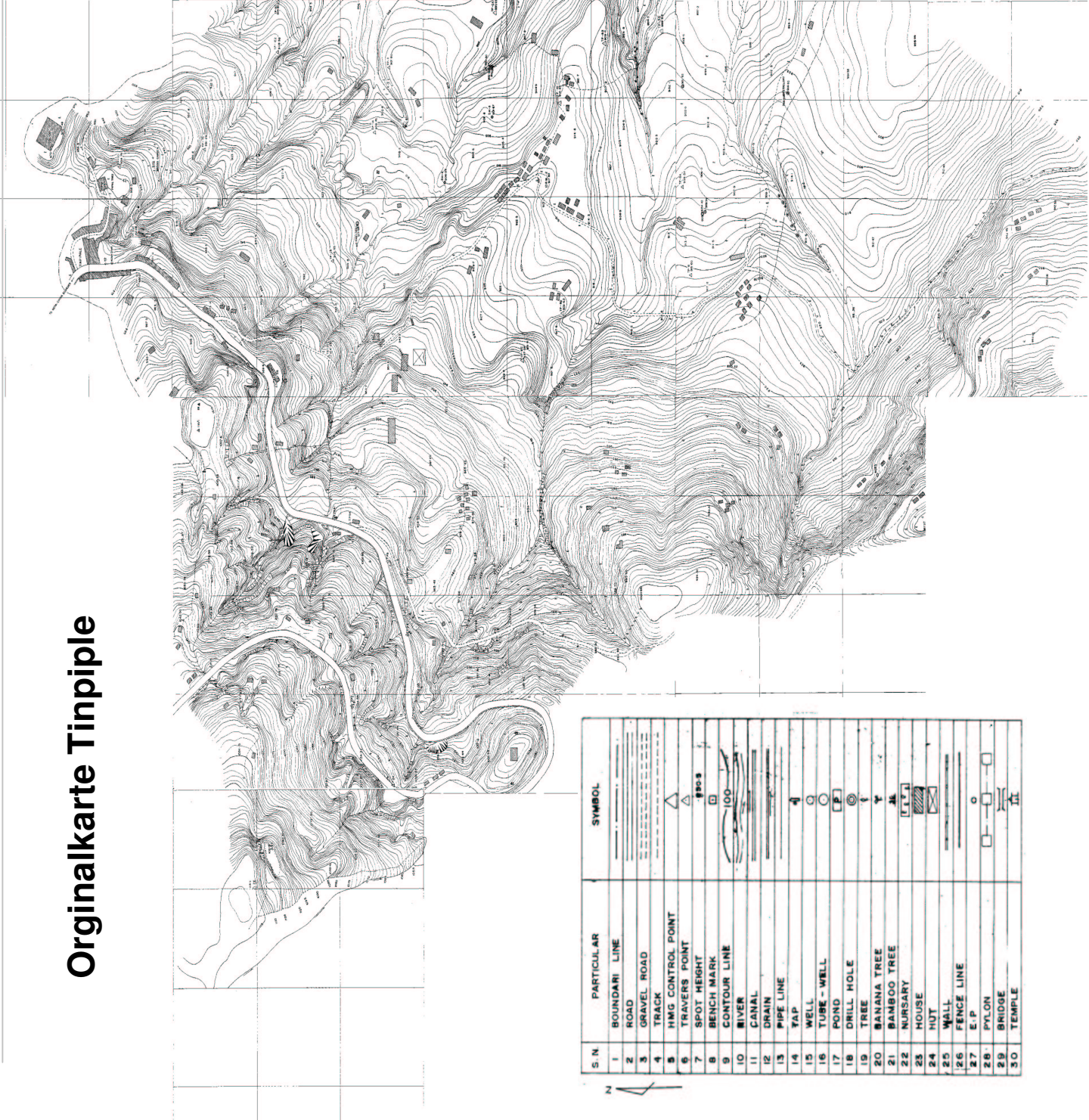
Tabelle A 3.2.2 Wasserbilanz für das Bari-Gebiet
Table A 3.2.2 Water balance in Bari

Datum	Precipitation	Evaporation	Evaporation	NPAB	NPAB	V+NPAK	Bilanz
April. 00	45.30	210.00	-210.00	1.12	-1.12	-211.12	-165.82
Mai 00	151.50	162.90	-162.90	4.50	-4.50	-167.40	-15.90
Juni 00	187.52	149.90	-149.90	50.06	-50.06	-199.96	-12.44
Juli 00	339.20	221.70	-221.70	649.70	-649.70	-871.40	-532.20
Aug. 00	290.60	257.10	-257.10	13.71	-13.71	-270.81	19.79
Sept. 00	117.30	332.30	-332.30	0.72	-0.72	-333.02	-215.72
Okt. 00	4.70	133.10	-133.10	0.76	-0.76	-133.86	-129.16
Nov. 00	4.40	138.80	-138.80	0.77	-0.77	-139.57	-135.17
Dez. 00	3.10	79.40	-79.40	2.78	-2.78	-82.18	-79.08
Jan.01	3.10	101.80	-101.80	7.56	-7.56	-109.36	-106.26
Feb. 01	12.20	147.10	-147.10	5.71	-5.71	-152.81	-140.61
März 01	4.20			10.58	-10.58	-10.58	-6.38
Summe	1163.12	1934.10		752.17		-2682.07	-1518.95

← ?
Meßfehler

Pan Ev	Pan Evapo	NPAB+V	Bilanz
157.50	-157.50	-158.62	-113.32
122.18	-122.18	-126.68	24.82
112.43	-112.43	-162.49	25.03
166.28	-166.28	-815.97	-476.77
192.83	-192.83	-206.53	84.07
249.23	-249.23	-249.94	-132.64
99.83	-99.83	-100.58	-95.88
104.10	-104.10	-104.87	-100.47
59.55	-59.55	-62.33	-59.23
68.93	-68.93	-76.48	-73.38
119.55	-119.55	-125.26	-113.06
138.30	-138.30	-148.88	-144.68
1590.68		-2338.65	-1175.53

Originalkarte Tinpiple



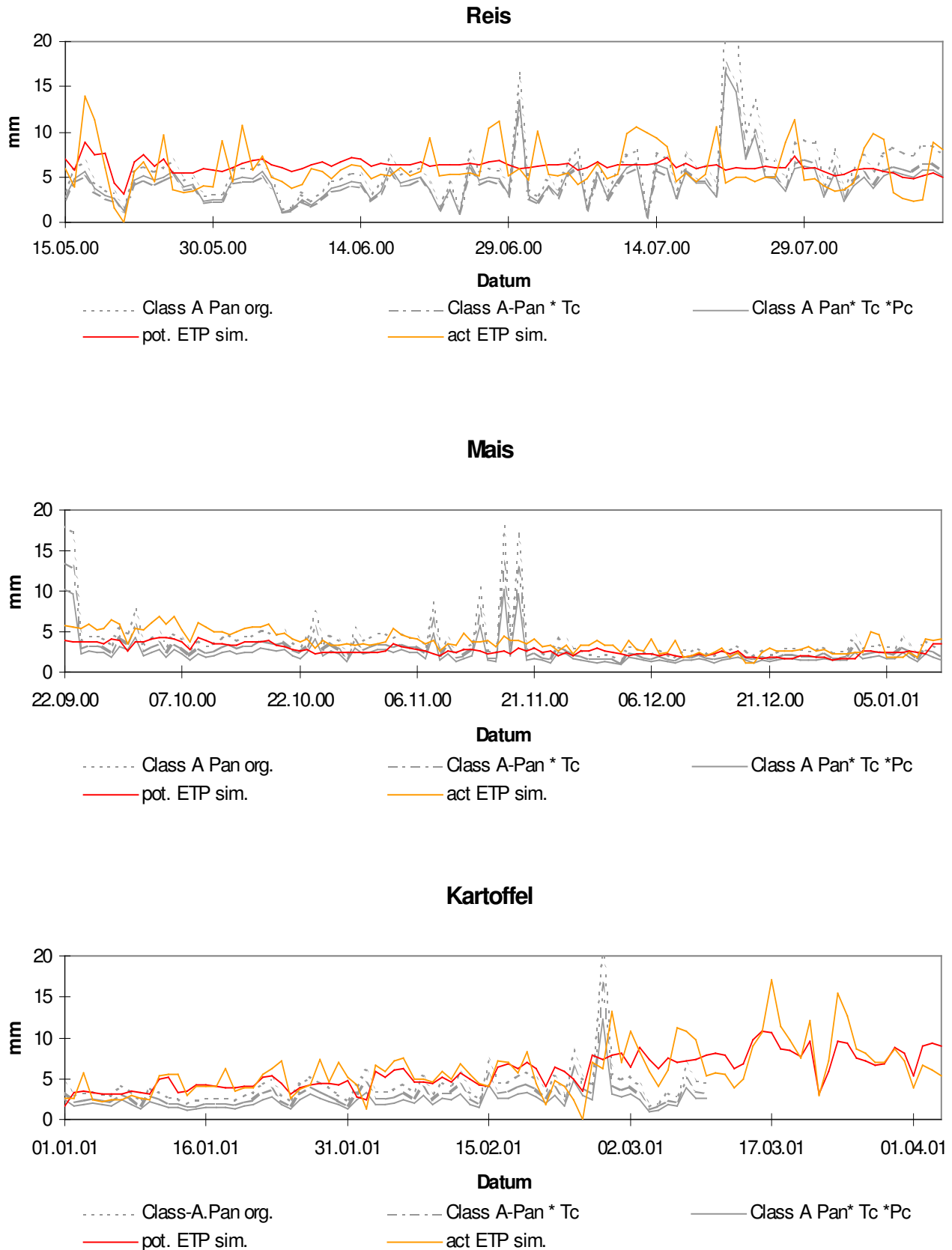


Abbildung A 4.1 Transformierte Class-A-Pan Verdunstungswerte für Reis, Mais und Kartoffel mit Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse
 Figure A 4.1 Transformed Class-A-Pan values against simulated evapotranspiration values

Kc-Werte für > 70% h und > 5 m/sec, Kesselkoeffizient (kpan) 0.75

paddy					
119 days	seedling	tillering	stem elongating	booting	
Kc	1.1	1.1	1.1	1.1	
day No.	135	165	180	185	
date	15-May	14-Jun	29-Jun	04-Jul	

heading	flowering	milking	grain formation	draught/maturity	
0.95	0.95	0.9	0.9	0.9	
200	210	225	240	246	
19-Jul	29-Jul	13-Aug	28-Aug	11-Sep	

maise					
83 days	establishment	vegetative	flowering	headformation	harvesting
Kc	0.3	0.7	1.05	1	0.95
day No.	266	285	336	349	366
date	22-Sep	11-Oct	01-Dec	14-Dec	31-Dec

potato					
83 days	emerging	vegetative	vegetativ	tuber.	maturity
Kc	0.4	0.7	1.05	0.85	0.7
day No.	3	33	45	67	86
date	03-Jan	02-Feb	16-Feb	08-Mar	28-Mar

Abbildung A 4.2 Pflanzenkoeffizienten (Kc) zur Verdunstungsberechnung aus Class-A-Pan Werten für die Leitkulturen Reis, Mais und Kartoffel
 Figure A 4.2 Plantcoefficents (Kc) for calculating from Class-A-Pan values paddy, corn and potato transpiration

Memo concerning the LAI**⇒ Sampling in different growing stages**

for crops:

- 1 Establishment
- 2 Vegetative stage
- 3 Flowering
- 4 Yield Formation
- 5 Ripening

for rice:

- 1 Field Transplantation
- 2 Tillering
- 3 Head Development
- 4 Heading
- 5 Grain Filling
- 6 Ripening

⇒ Actionplan

1. Plant density (plant/unit area of soil) also must be determined
2. Ten plants will be sampled
3. Each plant is weighed immediately (W_T) and
4. Separated into leaf blades, stalks and ears
5. Some leaves (sub-samples) are weighed (W_L)
6. The area of all leaves on a plant (sub sample) will be measured by checking the length (L) and maximum width (W)
7. Leaf area (A_L) and leaf weight (W_L) are measured on a sub sample of leaves and total leaf weight (W_{LT}) only is measured on n plants, example n =10)
8. All plant parts are dried to constant weight at 75 °C (by cutting the stalk into segments 20 – 30 cm) and afterwards weighed again
9. (the ratio of leaf area per unit leaf dry weight is the product of L and W and now can be calculated)

⇒ Tabulation

Growing stages	Plant density (plant/unit area of soil)	W_T Total plant weight fresh (gr)	W_L Leaf weight (gr)	L Leaf length (cm)	W Leaf width (cm)	N Number of leafs on plant	W_{Td} Total plant weight dried (gr)
1		1 2 3 . . . 10 (plant sample number)	(only some sub-samples)				
2							
3							
4							
5							
6							

A 6.1.1
A 6.1.1

Leitfaden zur Bestimmung des Blattflächenindex
Guideline to estimate leaf area index

Rice			
Day no	Average height	Average Tiller no	
0	0	0	Transplanting
7	0	0	Seedings
14	17	9	Early tillering
21	26	12	Tillering
28	30.75	13	"
35	39	15	"
42	55.5	17	Maximum tillering
49	60.25	17	Stem elongation
56	77	18	Pancile Primordia initiation
63	80.5	17	"
70	90.1	16	Heading
77	99.3	14	Pancil emergence
84	102.2	13	Pencile emergence to milking
91	105.3	13	Milking
98	105	13	"
105	105	13	Early dough
112	105	13	Dough
119	105	13	Ripening

A 6.1.2

Ermittlung des Wachstumsverlauf von Reis

A 6.1.2

Determination of development stages regarding to rice

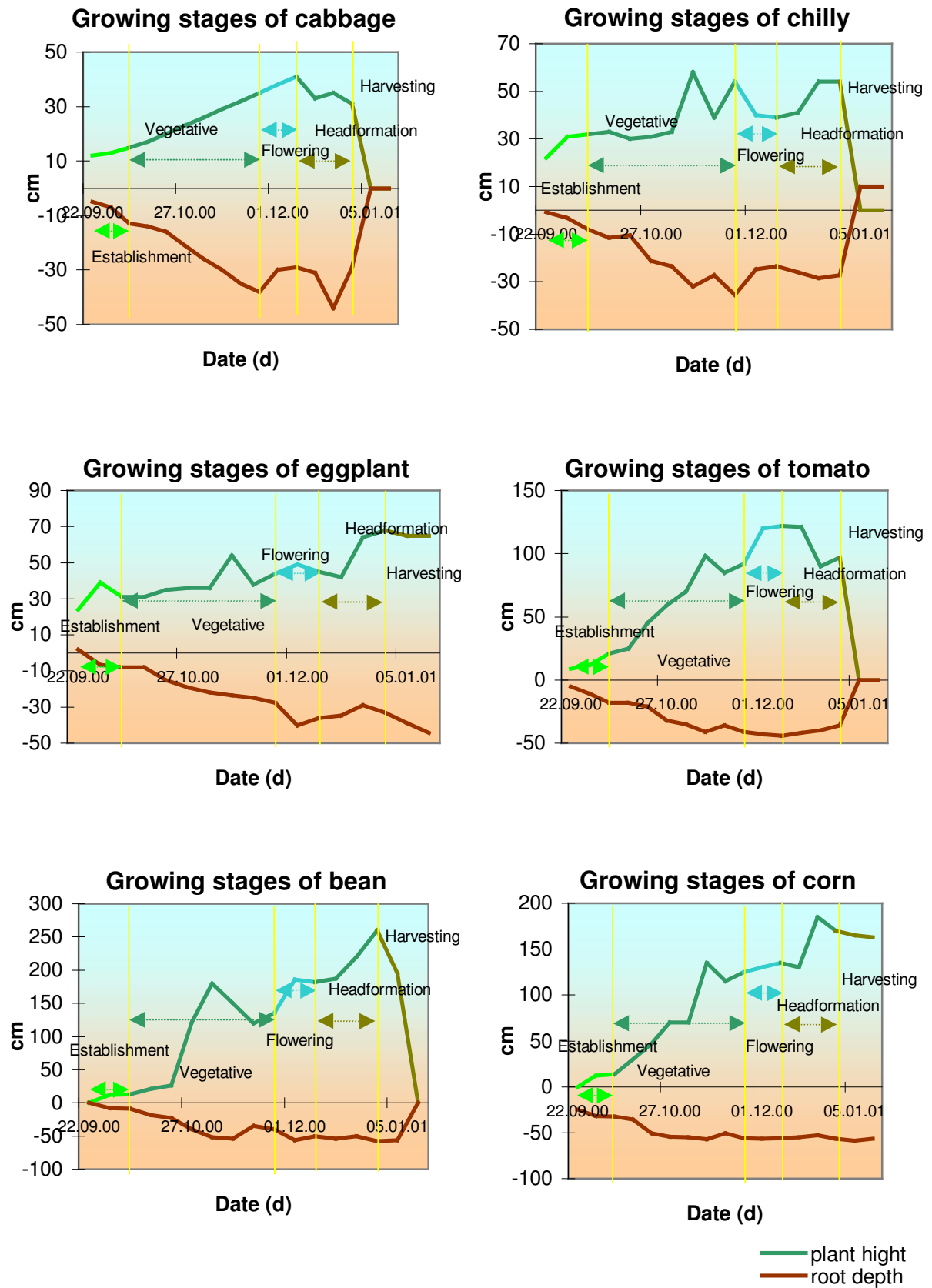
	Cabbage		Chilly		Eggplant		Tomato		Bean		Con		Day No
	root depth	plant height	root depth	plant height	root depth	plant height	root depth	plant height	root depth	plant height	root depth	plant height	
22.09.00	-5	12	-9	22	-13	24	-5	9	0	0	0	0	266
29.09.00	-7	13	-11	31	-19	39	-11	12	-8	12	-9	12	271
06.10.00	-13	15	-15	32	-20	31	-18	21	-9	13	-10	14	280
13.10.00	-14	17	-18	33	-20	31	-18	25	-18	21	-14	30	287
20.10.00	-16	20	-17	30	-25	35	-21	45	-23	26	-34	47	294
27.10.00	-21	23	-26	31	-28	36	-32	59	-40	122	-39	70	301
03.11.00	-26	26	-28	33	-30	36	-35	70	-52	180	-40	70	308
10.11.00	-30	29	-35	58	-31	54	-41	98	-54	150	-43	135	315
17.11.00	-35	32	-31	39	-32	38	-36	85	-35	120	-34	115	322
24.11.00	-38	35	-38	54	-34	44	-41	92	-40	135	-41	125	329
01.12.00	-30	38	-29	40	-43	49	-43	120	-56	185	-42	130	336
08.12.00	-29	41	-28	39	-40	45	-44	122	-50	182	-41	135	343
15.12.00	-31	33	-30	41	-39	42	-42	121	-54	187	-40	130	350
22.12.00	-44	35	-32	54	-35	64	-40	90	-50	220	-37	185	357
29.12.00	-29	31	-31	54	-38	68	-36	97	-58	280	-42	170	364
05.01.01	0	0	0	0	-42	65	0	0	-56	195	-45	165	5
12.01.01	0	0	0	0	-46	65	0	0	0	0	-42	163	12

A 6.1.3

Ermittlung des Wachstumsverlaufs anhand verschiedener typischer
Leitkulturen in Tinipale

A 6.1.3

Determination of development stages regarding to different index plants



A 6.1.4 Wachstumsverlauf verschiedener Leitkulturen während der vier Hauptentwicklungsphasen

A 6.1.4 Growing cycle represented by different typical index plants

Reis	Monat	Julian.Tage	Entwicklung.potential	Tage	%	Höhe	nom. Wt	kg/ha (Croped)	norm. Ernte	LAI (SAL25)	SC	LAI (SAL25)	SC
mai	156	14	117.6470588	0	0	0	-0.17293698	0	-0.03469259	0.000	0.000	0	0.000
	150	21	117.6470588	17	0	0	0	300	0.017241379	0.750	0.313	0.66	0.281
	157	28	117.6470588	26	0	0	0.09155646	600	0.08963317	1.500	0.828	1.32	0.483
	164	35	23.52941176	30.76	0	0	0.136871925	960	0.129310345	2.375	0.896	2.09	0.648
	171	42	29.41176471	39	0	0	0.22330463	1400	0.20589662	3.500	0.826	3.08	0.786
	178	49	36.29411765	65.5	0	0	0.391658189	2400	0.3719310345	6.000	0.560	6.28	0.529
	185	56	41.17647059	80.26	0	0	0.439979684	2600	0.413793103	6.300	0.361	6.72	0.343
	192	63	47.05882353	77	0	0	0.510376389	3700	0.603448276	9.250	0.360	8.14	0.383
	199	70	52.94117647	80.5	0	0	0.64591889	4000	0.655172414	10.000	0.363	8.14	0.383
	206	77	58.82352941	90.3	0	0	0.745641913	4400	0.724137531	11.000	0.366	9.68	0.392
juni	213	84	64.70588235	99.3	0	0	0.83720296	5000	0.827586207	12.500	0.368	11	0.396
	220	91	70.58823529	102.2	0	0	0.868134486	5200	0.862063666	13.000	0.368	11.44	0.397
	227	98	76.47058824	105.3	0	0	0.89827106	5400	0.896551224	13.500	0.369	11.88	0.397
	234	105	82.35294118	108	0	0	0.95218718	5300	0.879310345	13.250	0.369	11.88	0.397
	241	112	88.23529412	108	0	0	0.95218718	5300	0.879310345	13.250	0.369	11.88	0.397
	248	119	94.11764706	108	0	0	0.95218718	5400	0.896551224	13.500	0.369	11.88	0.397
	255	126	100	108	0	0	0.95218718	6000	1	15.000	0.369	0.1	0.396

Maiz	Monat	Julian.Tage	Entwicklung.potential	Tage	%	Höhe	nom. Wt	kg/ha (Croped)	norm. Ernte	LAI	SC	kg/ha (Croped)	norm. Ernte	LAI	SC
september	266	14	14.6	12	0	0	0	0	-0.01	0	0.00	0	-0.01	0.00	0.00
	271	14	12.50	14	0	0	0.011550694	20	0.00	0.035	0.02	20	0.00	0.04	0.02
	280	21	18.75	30	0	0	0.04046343	360	0.12	0.447	0.23	200	0.10	0.36	0.26
	287	28	25.00	47	0	0	0.202312139	680	0.24	1.224	0.46	400	0.20	0.72	0.30
	294	35	31.25	70	0	0	0.33520116	1030	0.36	1.854	0.60	600	0.31	1.08	0.42
	303	42	37.50	70	0	0	0.33520116	1110	0.39	1.898	0.63	600	0.31	1.08	0.42
	316	49	43.75	136	0	0	0.710382689	2030	0.72	3.664	0.84	1300	0.68	2.34	0.69
	322	56	50.00	116	0	0	0.595375723	1710	0.61	3.078	0.79	1100	0.57	1.98	0.63
	329	63	56.25	125	0	0	0.653119191	1900	0.68	3.42	0.82	1200	0.62	2.16	0.66
	336	70	62.50	130	0	0	0.682030925	1900	0.68	3.42	0.82	1300	0.68	2.34	0.69
oktober	343	77	68.75	136	0	0	0.710382689	2070	0.74	3.726	0.84	1300	0.68	2.34	0.69
	350	84	75.00	130	0	0	0.682030925	2070	0.74	3.726	0.84	1300	0.68	2.34	0.69
	357	91	81.25	186	0	0	1	2800	1.00	5.04	0.92	1900	0.99	3.42	0.82
	364	98	87.50	170	0	0	0.913294798	2600	0.93	4.68	0.90	1700	0.89	3.06	0.78
	371	105	93.75	166	0	0	0.884330064	2590	0.92	4.68	0.92	1900	0.99	3.42	0.82
	378	112	100.00	163	0	0	0.87253237	2590	1.00	5.04	0.92	1910	1.00	3.44	0.82

A 6.1.5 Ermittlung des Blattflächenindexes LAI und des Bedeckungsgrades in Bezug auf Trockengewicht am Beispiel für Reis und Mais
A 6.1.5 Determination of leaf area index and soil cover regarding to the dry weight represented by rice and maize

Tabelle A 6.2.1
Table A 6.2.1

Quelldatei: Bodenaufnahme im Untersuchungsgebiet Tinipple
Soil survey in the investigation area Tinipple

ID	Name	X-Wert	Y-Wert	Höhe	Bezeichnung	Bodenbestimmung	Klasse	Oberboden (Code/Tiefe)	Unterboden (Code/Tiefe)
16	NPQ K	363837.09	3056811.81	892.381	HB46-khe	SiO-160;Tu-180;Su-230	3	2.6	2.6
26	HB-1khe	363912.87	3056809.22	886	HB-1khe	SiO-205	3	2.6	2.6
34	HB-8khe	363901.31	3056744.41	886	HB-8khe	SiO-125;Tu-190	3	2.6	2.6
48	KS-Mast				HB5-bar	SiO-200	3	2.6	2.6
50	Banana				HB3-bar	Siu0-20;Si-170	3	2.6	2.6
51	HB1-bar				HB1-bar	SiO-200	3	2.6	2.6
29	HB-4khe	363976.86	3056757.62	883	HB-4khe	SiO-60;S;fS-165;Tu-195;Ufs-210	3	2.3	4.4
38	HB18-khe	363821.54	3056739.14	887	HB18-khe	SiO-70;fSmS-200	3	2.4	4.4
25	HB26-khe	363877.50	3056645.75	897.820	HB26-khe	SiO-25;fSmS-35;Lts-50;Tfs-65;Tu-90;Ut-125,Tu-230	3	2.2	1.3
36	HB10-khe	364026.88	3056712.32	878	HB10-khe	SiO-75;Tu-245	3	2.4	1.4
9	60er Suctio	364006.33	3056717.78	880.583	HB36-khe	Ufs0-60	4	4.4	4.4
18	TDR Tube KS	363662.98	3056727.23	906.244	TDR2-khe	Ufs0-70	4	4.4	4.4
7	160er Sucti	364006.61	3056718.05	880.553	HB35-khe	Ufs0-120;Tu-160	4	4.6	4.6
24	HB22-khe	363784.21	3056686.50	901.550	HB22-khe	Ufs-215	4	4.6	4.6
28	HB-3khe	363957.45	3056765.87	884	HB-3khe	Ufs0-210;fSu-230	4	4.6	4.6
44	Studi2	363816.99	3056749.23	888	HB47-khe	Ufs0-180	4	4.6	4.6
46	DH3 NPGC	363631.52	3057068.65	901.824	B3-bar	Ufs0-265	4	4.6	4.6
14	NPQ i	363987.39	3056664.65	883.446	HB48-khe	fSiO-15Si-95;Tu-214	3	4.2	2.2
33	HB-7khe	363949.61	3056715.92	884	HB-7khe	fSu0-85;Si-110;Tu-120;Ufs-250	3	4.4	2.4
1	NPQ E	364004.47	3056720.85	880.876	HB29-khe	Ufs0-90;Si-125;Ut-175;Tu-250	4	4.4	2.5
8	130er Sucti	364006.98	3056718.19	880.568	HB29-khe	Ufs0-90;Si-125;Ut-175;Tu-250	4	4.4	2.5
41	HB38-khe	363664.64	3056843.73	902	HB38-khe	Ufs0-105;Si-135;fSu-210;Tu-260	4	4.5	2.5
47	KS-TDR				TDR1-bar	Ufs0-100;Ut-170;Ufs-270	4	4.5	2.5
32	HB-6akhe	364011.06	3056720.10	879	HB-6akhe	Ufs0-10;Tu-230	4	4.1	1.2
43	Studi1	363817.50	3056749.57	888	HB43-khe	Ufs0-23;Tu-95;Si-110;Tu-170;S-175;Su-195;tu-230;Ut-255	4	4.2	1.2
2	NPQ T	364007.05	3056719.44	880.578	HB14-khe	Ufs0-60;Tu-125	4	4.4	1.4
3	NPQ R	364007.78	3056719.45	880.568	HB13-khe	Ufs0-85;Tu-240	4	4.4	1.4
4	NPQ Y	364007.55	3056719.09	880.602	HB28-khe	Ufs0-65;Lts-85;U-100	4	4.4	1.4
5	NPQ X	364007.94	3056718.79	880.608	HB27-khe	Ufs0-55;fSu-75;Tu-160	4	4.4	1.4
6	100er Sucti	364006.79	3056718.31	880.572	HB34-khe	Ufs0-80;Tu-95	4	4.4	1.4
19	NPQ d	363536.54	3056813.79	909.337	HB41-khe	Uf0-65;Tu-100;Ufs-120Ut-170;ufs-190Tu-200	4	4.4	1.4
37	HB11-khe	364009.12	3056720.79	880	HB11-khe	Ufs0-90;Tu-255	4	4.4	1.5
10	TDR Tube TV	364006.00	3056717.96	880.550	TDR1-khe	Ufs0-110;Tu-195;Ufs-215;Tu260	4	4.5	1.5
11	NPQ S	364010.01	3056718.72	880.073	HB6b-khe	Ufs0-10;Ut-250	4	4.1	3.2
35	HB-9khe	363850.95	3056770.83	888	HB-9khe	Ufs0-30;U-120;Tu-140;fS-165;Si-250	4	4.2	3.3
21	NPQ H	363663.50	3056842.00	901.930	HB30-khe	Ufs0-105;Si-210;Tu-250	4	4.5	3.5
13	NPQ G	364045.47	3056724.81	876.809	HB44-khe	Lts-20;Tu-225;Lts-290	11	1.2	1.2
12	NPQ g	364045.09	3056725.32	877.282	HB45-khe	Lts0-30;Tu-260	11	1.2	1.3
39	HB19-khe	364057.20	3056713.04	875	HB19-khe	fSu0-10;Ufs-90;Ut-200	3	3.1	3.1
23	B7-khe	364045.63	3056721.72	876.195	B7-khe	Ufs0-30;Ufs-50;tu-255	4	3.2	3.2
40	HB33-khe	363661.85	3056727.29	906	HB33-khe	Uf0-70	7	3.4	3.4
17	KS-Mast	363664.07	3056728.22	906.162	HB32-khe	Uf0-200	7	3.6	3.6
22	HB21-khe	363657.05	3056716.60	906.630	HB21-khe	Uf0-250	7	3.6	3.6
27	HB-2khe	363933.10	3056779.91	886	HB-2khe	fSu0-160;Lts-250	3	3.6	3.6
49	KS-NPGF				HB4-bar	Uf0-45;Ut3-100;Ut4-295	7	3.6	3.6
30	HB-5akhe	364001.63	3056701.47	879	HB-5akhe	fSu0-10;Si-145;Tu-155;SL-170;fSu-220	3	3.1	2.2
31	HB-5bkhe	364002.04	3056702.30	879	HB-5bkhe	fSu0_10;Si-150;fSu-145;-Ut-155	3	3.1	2.2
15	NPQ I	363987.16	3056664.94	883.459	HB25-khe	fSu0-35;Ufs-95;Tu-260	3	3.3	4.3
42	HB40-khe	363538.34	3056818.62	909	HB40-khe	Uf0-10;Tu-125;Ufs-155;fSu-195;Tu-230	7	3.1	1.2
20	NPQ D	363533.89	3056818.90	909.250	HB42-khe	Uf0-80;Tu-110;-Ufs-140;Ut-190;Tu-240	7	3.4	1.4
45	DH9 (Mango	363615.06	3057179.82	903.390	HB2-bar	Uf0-70;Tu-245	7	3.4	1.4

Tabelle A 6.2.2 Quelldatei Bodenart, Bodenschlüssel und Leitfähigkeit
Table A 6.2.2 Soil type, soil code and hydraulic conductivity

ID	Deutsch	Kf (cm/d)	Kf (m/d)	Kf m/s	Kf (cm/s)	N (cm/d USDA)	Bodenart	USDA	Klasse	Kf (cm/d)	Kf (m/d)	Kf (m/s)	Kf (cm/s)	LN (cm/d)
16	L	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
26	L	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
34	L	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
48	L	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
50	L	47	0.4700	5.44E-06	5.44E-04	3.85	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
51	L	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
29	LS	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
38	LS	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam / sand	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
25	LT	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam / clay loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
36	LT	51	0.5100	5.90E-06	5.90E-04	3.93	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
9	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
18	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
7	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
24	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
28	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
44	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
46	S	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
14	SL	14	0.1400	1.62E-06	1.62E-04	2.64	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
33	SL	92	0.9200	1.06E-05	1.06E-03	4.52	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
1	SL	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
8	SL	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
41	SL	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
47	SL	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
32	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
43	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
2	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
3	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
4	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / clay loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
5	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / sandy loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
6	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
19	ST	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
37	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
10	ST	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
11	SU	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silt	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
35	SU	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
21	SU	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / sandy loam	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
13	T	9	0.0900	1.04E-06	1.04E-04	2.20	clay loam	CL	11	6.24	0.0624	7.22E-07	7.22E-09	1.83
12	T	9	0.0900	1.04E-06	1.04E-04	2.20	clay loam / silty clay	CL	11	6.24	0.0624	7.22E-07	7.22E-09	1.83
23	U	92	0.9200	1.06E-05	1.06E-03	4.52	sandy loam / silt loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
39	U	27	0.2700	3.13E-06	3.13E-04	3.30	silt loam / silty clay	SIL	4	10.80	0.1080	1.25E-06	1.25E-08	2.38
40	U	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73
17	U	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73
22	U	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73
27	U	92	0.9200	1.06E-05	1.06E-03	4.52	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
49	U	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73
30	UL	92	0.9200	1.06E-05	1.06E-03	4.52	sandy loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
31	UL	92	0.9200	1.06E-05	1.06E-03	4.52	sandy loam / silt loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
15	US	92	0.9200	1.06E-05	1.06E-03	4.52	sandy loam / silt loam	SL	3	106.27	1.0627	1.23E-05	1.23E-07	4.67
42	UT	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73
20	UT	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73
45	UT	45	0.4500	5.21E-06	5.21E-04	3.81	silty clay	SIC	7	0.48	0.0048	5.56E-08	5.56E-10	-0.73

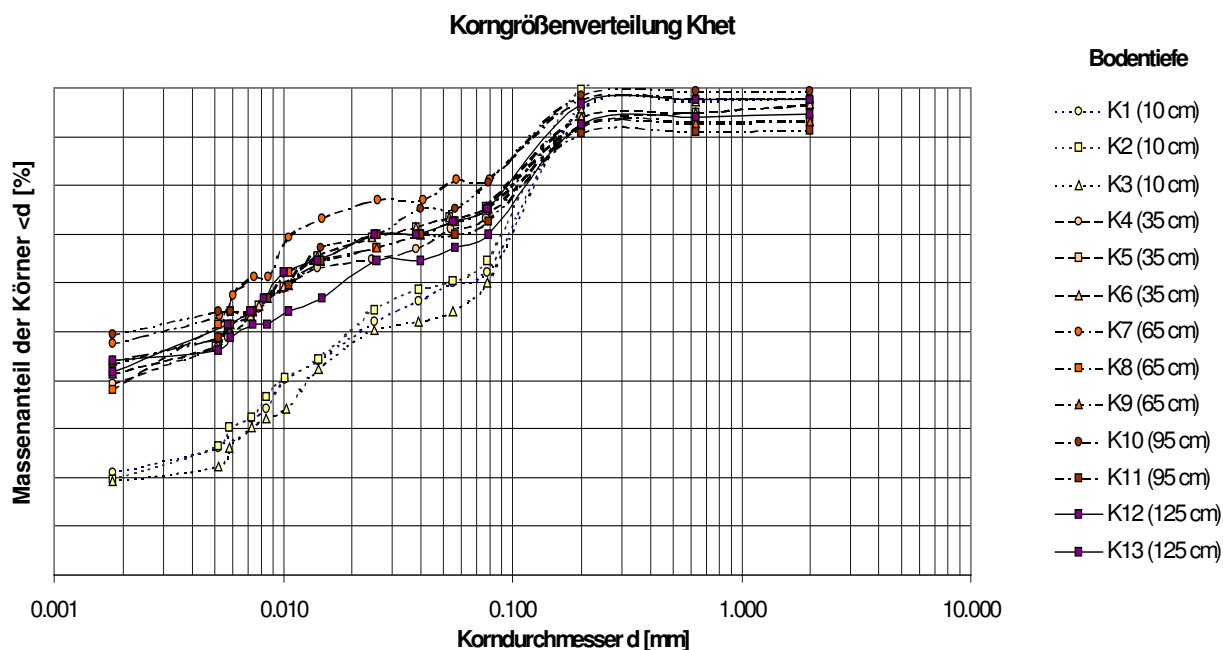


Abbildung A 6.2.3
Figure A 6.2.3

Korngrößenverteilung am Beispiel der Khet-Probe 2
Grain Size Distribution for Khet soil sample 2

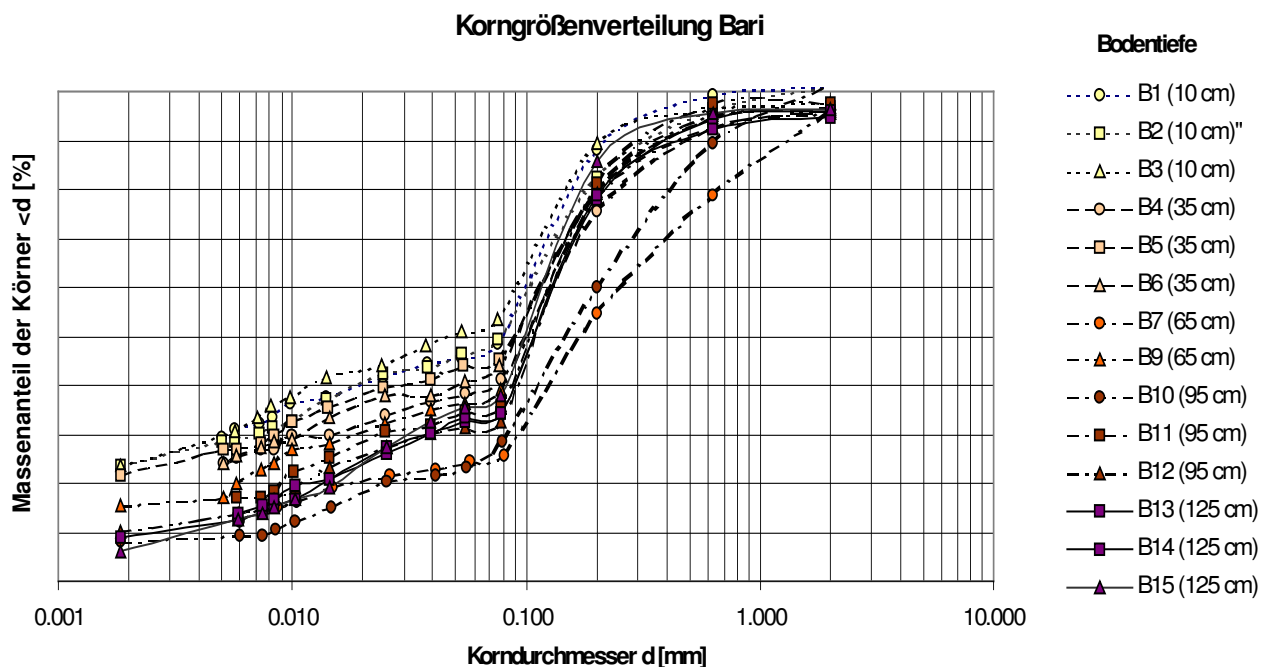


Abbildung A 6.2.4
Figure A 6.2.4

Korngrößenverteilung am Beispiel der Bari-Probe 2
Grain Size Distribution for Bari soil sample 2

Tabelle A 6.2.5 Korngrößenanalyse und Klassifizierung der Bodenart
Table A 6.2.5 Grain size distribution analysis at khet- and bari-land

Bodentiefe	T %	U %	S %	AG Boden	Bodenkundl. Kartier- anleitung	USDA classification scheme
Khet 1						
15cm	25.95	47.71	26.09	Ls2	schwach sandiger Lehm	silt loam / loam
35 cm	25.73	47.08	25.35	Ls2	schwach sandiger Lehm	silt loam / loam
65cm	29.06	46.79	24.02	Lt2	schwach toniger Lehm	silt loam / loam
95 cm	32.17	39.68	26.23	Lt2	schwach toniger Lehm	clay loam
125 cm	21.28	44.14	34.58	Ls2	schwach sandiger Lehm	silt loam
Khet 2						
15 cm	20.03	42.22	36.77	Ls3	mittel sandiger Lehm	loam
35 cm	39.57	35.32	21.19	Lt3	mittel toniger Lehm	clay loam
65 cm	43.25	34.03	17.57	Lt3	mittel toniger Lehm	clay
95 cm	46.47	30.21	18.77	Tu2	schwach schluffiger Ton	clay
125 cm	42.89	29.81	23.48	Lts	sandig-toniger Lehm	clay
Bari 1						
15 cm	17.94	33.19	49.23	Ls3	mittel sandiger Lehm	laom
35 cm	22.98	25.02	47.3	Ls4	stark sandiger Lehm	loam
65 cm	32.38	31.56	33.5	Lt2	schwach toniger Lehm	loam
95 cm	32.02	32.07	34.13	Lt2	schwach toniger Lehm	clay loam
125 cm	35.38	34.55	29.39	Lt3	mittel toniger Lehm	clay loam
Bari 2						
15 cm	23.81	26.32	48.16	Ls4	stark sandiger Lehm	sandy clay loam
35 cm	21.85	22.85	33.36	Ls4	stark sandiger Lehm	sandy clay loam
65 cm	15.59	20.64	63.26	Sl4	stark lehmiger Sand	sandy loam
95 cm	9.72	28.83	65.88	Sl3	Mittel schluffiger Sand	sandy loam
125 cm	6.86	27.50	60.13	Su3	mittel schluffiger Sand	sandy loam

aus jeweils 3 Parallelproben gemittelt.

Tabelle A 6.2.6 Lagerungsdichte und Porosität
Table A 6.2.6 Soil density and porosity

Bodentiefe	Lagerungsdichte		Porosität
Khet 1	Ld		%
10 cm	1,47	Ld2 gering	53,22
30 cm	1,72	Ld3 mittel	43,88
60 cm	1,75	Ld3 mittel	44,12
90 cm	1,7	Ld3 mittel	47,04
120 cm	1,59	Ld2 gering	49
Khet 2			
10 cm	1,37	Ld1 sehr gering	
30 cm	1,52	Ld2 gering	
60 cm	1,46	Ld2 gering	
90 cm	1,36	Ld1 sehr gering	
120 cm	1,57	Ld2 gering	
Bari 1			
10 cm	2,2	Ld5 sehr hoch	47,97
30 cm	2,28	Ld5 sehr hoch	42,96
60 cm	2,37	Ld5 sehr hoch	36,68
90 cm	2,26	Ld5 sehr hoch	37,07
120 cm	2,1	Ld5 sehr hoch	39,12
Bari 2			
10 cm	1,4	Ld2 gering	
30 cm	1,52	Ld2 gering	
60 cm	1,34	Ld1 sehr gering	
90 cm	1,47	Ld2 gering	
120 cm	1,35	Ld1 sehr gering	

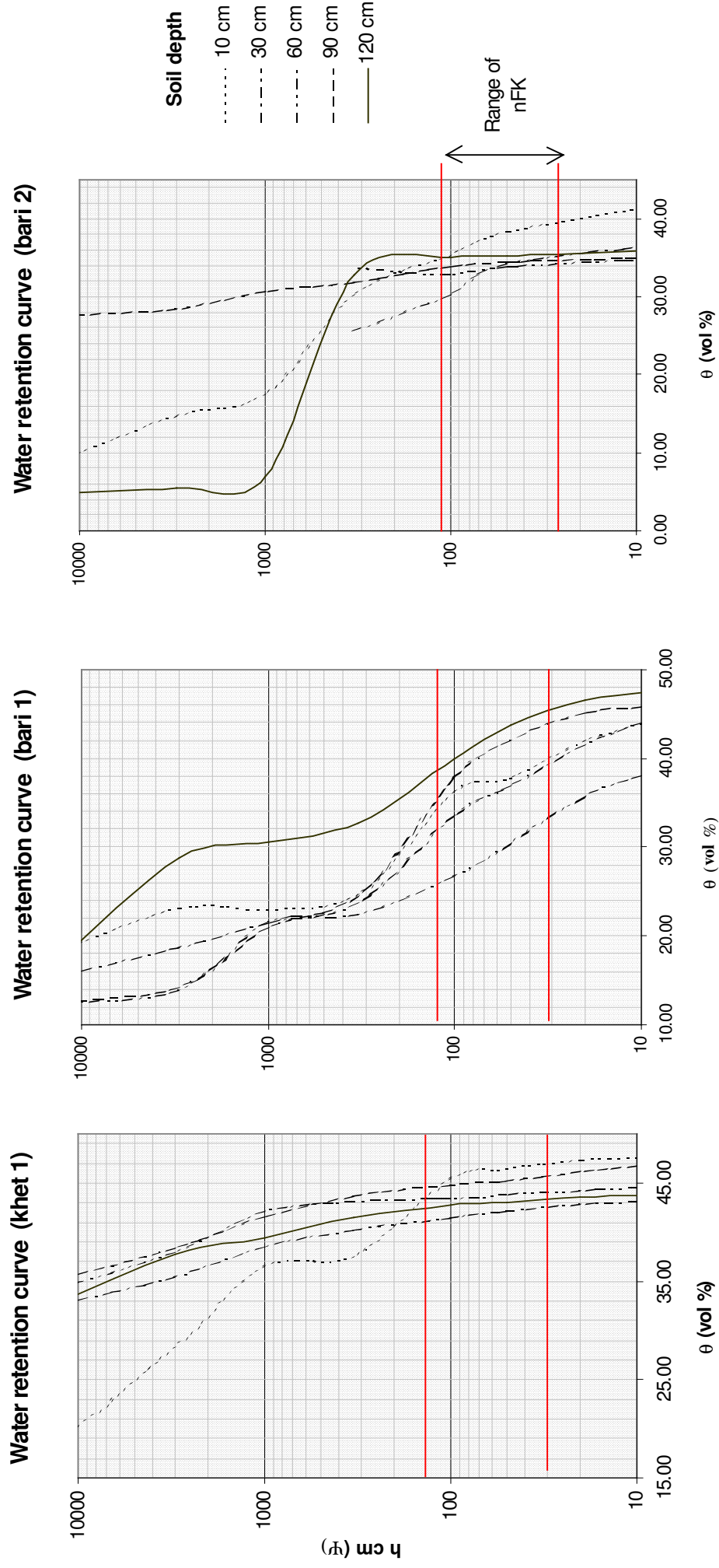


Abbildung 6.2.7 Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung am Beispiel des Khet- und Bari-Land-Bodens
 Figure 6.2.7 Water retention curve for the in Khet- and Bari-land

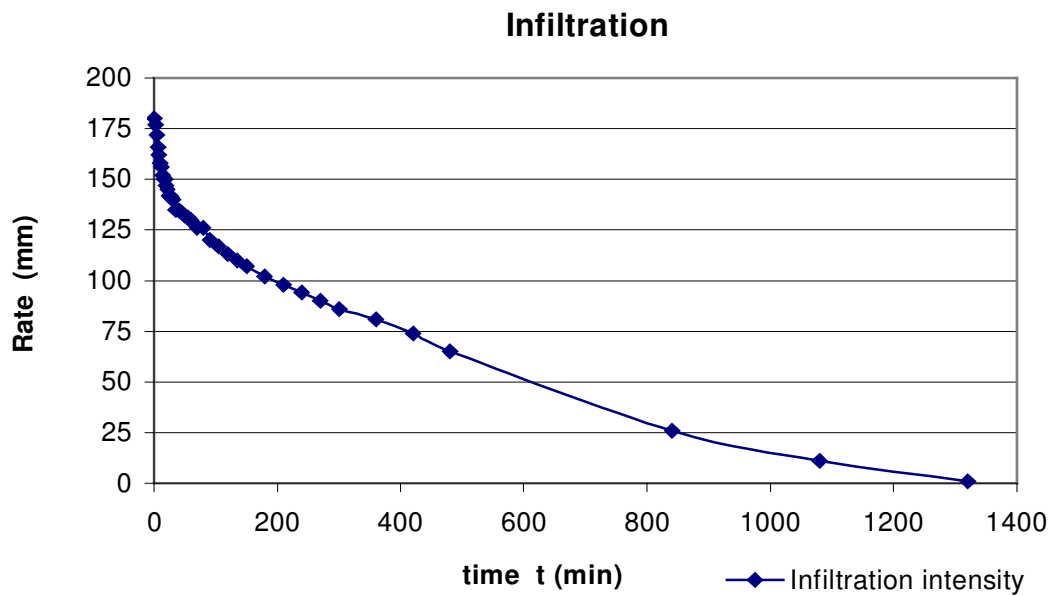


Abbildung A 6.2.8 Typische Infiltrationskurve im Bari-Gebiet
 Figure A 6.2.8 Typical Infiltration curve of bari land

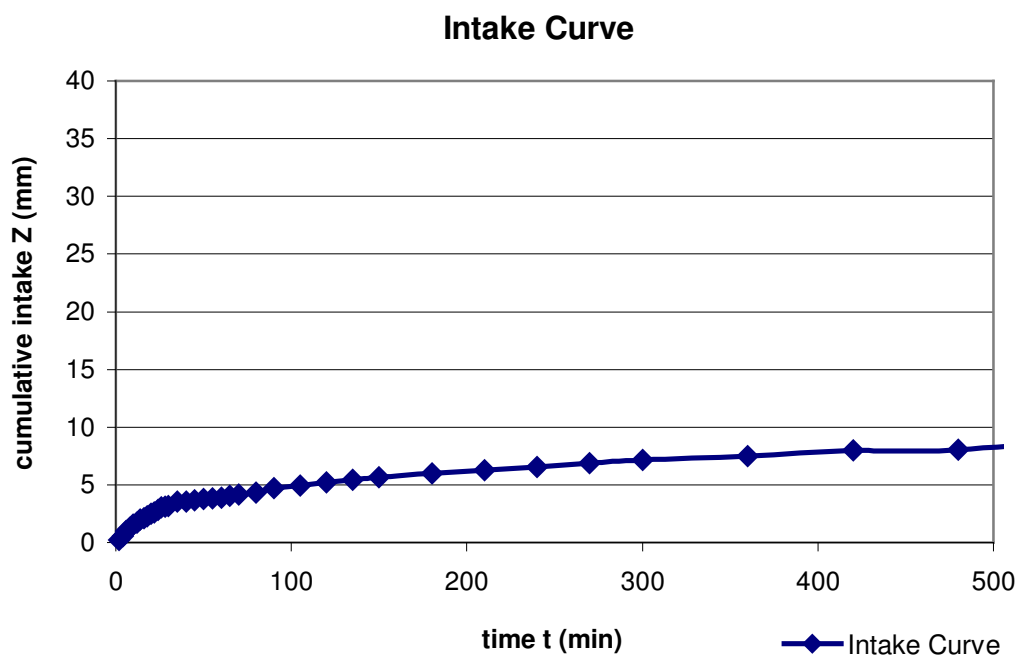
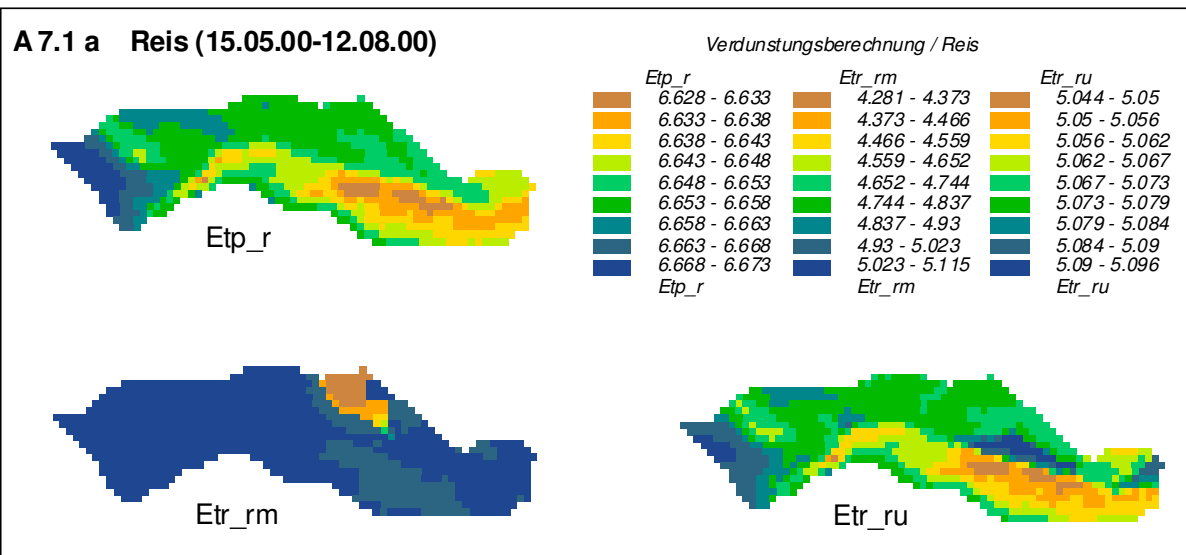
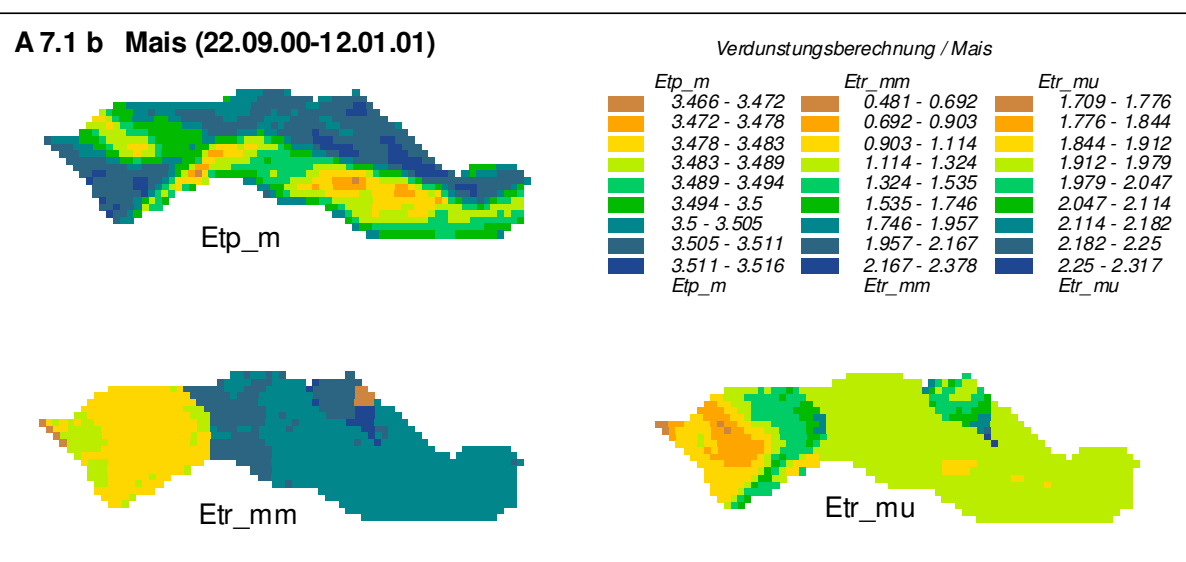
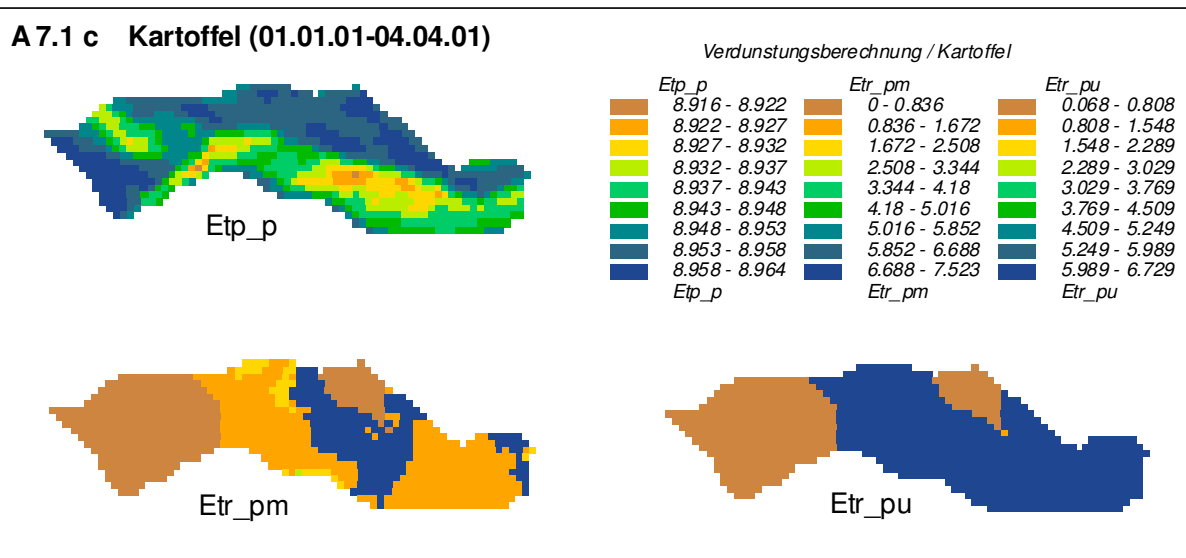


Abbildung A 6.2.9 Typischer kumulativer Infiltrationsverlauf für einen tonigen Lehm Boden
 Figure A 6.2.9 Typical intake curve: example for clay loam

A 7.1 a Reis (15.05.00-12.08.00)**A 7.1 b Mais (22.09.00-12.01.01)****A 7.1 c Kartoffel (01.01.01-04.04.01)**

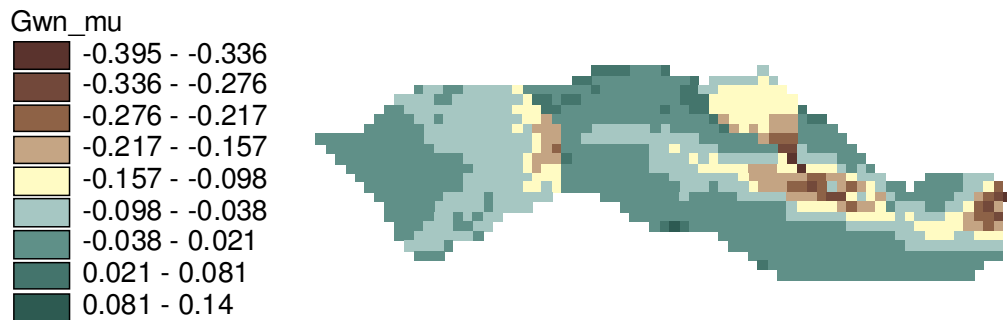
(Zeichenerklärung: _r = Reis; _m = Mais; _p = Kartoffel gefolgt von: m = Mischboden und u = Einheitsboden
potentielle (Etp) und aktuelle Evapotranspiration (Etr) [mm/d])

A 7.1 Beispiele für den Wasserentzug durch Verdunstung für die Leitkulturen Reis im Hauptmonsun (A 7.1a), für Mais im Postmonsun (A 7.1b) und für Kartoffel in der Trockenzeit (A 7.1c).

A 7.1 Examples for model calculation of pot. and act. evapotranspiration [mm/d] for paddy, corn and potato

Die Modellberechnungsergebnisse der potentiellen (Etp) und aktuellen Verdunstung (Etr) [mm/d] werden im Allgemeinen zur Kalkulation des Bewässerungswasserbedarfs benötigt. Die Abbildungen A 7.1a-c zeigen den Einfluß der Bodenbeschaffenheit auf die aktuelle Verdunstung, spiegeln aber auch die Exposition des Geländes wieder. Im Beispiel des Reisanbaus (Etr_rm) wird zudem noch der Einfluß der überstauten Bewässerungsbecken ersichtlich.

Mittels der Visualisierung der Modellergebnisse können Gis-Karten helfen, im Sinne eines verstärkten Gewässerschutzes kritische Zonen im Einzugsgebiet ausfindig zu machen. Die folgende Abbildung A 7.2 zeigt am Beispiel des Maisanbaus während des Postmonsuns an einem pauschalisierten Boden auf Basis fiktiver Äquiverhältnisse potentielle Exfiltration aus dem Grundwasserkörper. Die Grundwasserneubildung hat dagegen nur geringen Anteil. Wenn diese Annahmen der Realität entsprechen würden, gäbe es nur minimale Kontaminationsgefahr durch wassergebundene Schadstoffe (Pestizide) im Grundwasser. Anhand entsprechender Karten wäre möglich, die betroffenen Bauern auf gefährdete Zonen aufmerksam zu machen, so daß auf diesen Parzellen Pestizidapplikationen den Gegebenheiten angepaßt, bzw. reduziert werden müßten.



A 7.2 Kalkulationsbeispiel für potentielle Grundwasserneubildung bzw. Exfiltration während des Maisanbaus im Postmonsun (Mittelwert in: mm/d)

A 7.2 Example of model calculation for recharge or exfiltration during post-monsoon with corn (mean, mm/d)